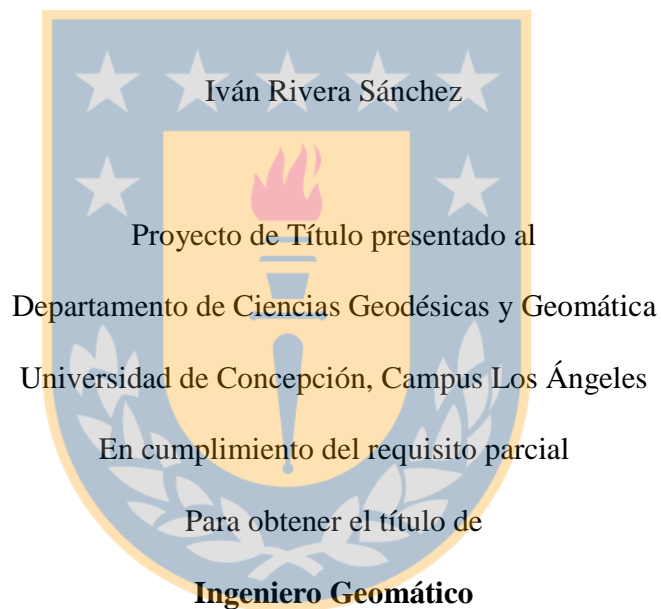


**Estimación de coordenadas de una red GPS de alta precisión en la ciudad de Los
Ángeles**



Escrito bajo la orientación del profesor

Msc. Henry Montecino C.

Aprobado por la comisión

Dra. Alicia Rivas

Ing. Jaime Ravanal P.

Los Angeles

Noviembre, 2016



Resumen

Las redes geodésicas, son estructuras de control que proporcionan la base para estudios en diferentes escalas de la superficie terrestre. En este contexto nace la idea de estimar las coordenadas de una red Geodésica local vinculada a un sistema global, que contribuya y permita los que hacerés prácticos y académicos de la comuna de Los Ángeles y sus alrededores.

La red local se conforma por 6 puntos al rededor de la ciudad, y la red global por 4 estaciones fiduciales que están dentro del marco de referencia SIRGAS 2013.0. La metodología empleada consta de una etapa de captura de datos y otra de post procesamiento. La etapa de captura de datos es llevada a cabo mediante una campaña utilizando instrumental GPS utilizando dos sesiones, y la etapa de post procesamiento se realiza mediante un software científico de procesamiento de datos Bernese 5.2. La etapa de post procesamiento, es donde radica la mayor parte del trabajo, en ella se realizan distintas estrategias para conseguir una alta calidad en los resultados.

Finalmente, los resultados entregados confirman una red de primer orden según los criterios de una red de control horizontal de Bossler (1984). Además, se entregan las coordenadas correspondientes una época de definición 2013.0 en conjunto a las precisiones obtenidas. En ellas, las estaciones fiduciales de red SIRGAS poseen una precisión sub milimétrica, y las estaciones pertenecientes a la red local una precisión milimétrica.

Dedicatoria

"Dedicado a mis padres.....y a mis abuelos que me miran de arriba"



Agradecimientos

En el presente proyecto de título quiero agradecer a mi profesor guía Msc. Henry Montecino C. quien fue el que aportó con la idea y la estructura principal de este trabajo. Sin sus consejos, su permanente preocupación y las gestiones realizadas, nada pudo haberse concretado.

Me siento profundamente agradecido de mis padres por permitirme la posibilidad de estudiar, apoyarme y levantarme todas las veces que tuve problemas. A mi hermano Fabián R. que siempre creyeron en mí. A mi pareja Vanessa M, que siempre me motivo a terminar mi carrera y que también estuvo presente en los malos momentos que pasé.

Al tío Manuel Cifuentes que me facilitó instrumental de apoyo necesario además de consejos y palabras de aliento. A la tía Gaby que siempre me mostró una gran voluntad y disposición. También agradecer el tío Jorge , me ayudo con las labores técnicas relacionadas a la informática. A mi compañero David Flores por facilitarme con gran disposición los datos que eran necesarios.

Agradecer a los alumnos de Geodesia II y a mis compañeros del Modulo VI, que me ayudaron en las labores de terreno , mostrando una gran disposición y preocupación desinteresada.

A mi amigo Marcelo C. y su familia que me acogieron, y me hicieron sentir uno más en su familia. A todos mis amigos y familiares presentes en todo este proceso.

No encuentro las palabras para retribuir todo el cariño que todos ustedes me dieron, pero espero poder manifestar de alguna manera mi gratitud.

¡A todos ustedes muchas gracias!

Índice de Contenidos

1	Introducción	10
2	Objetivos	11
2.1	Objetivo General	11
2.2	Objetivo específico.....	11
3	Foco.....	11
4	Marco teórico	13
4.1	Geodesia.....	13
4.1.1	Sistemas de referencia.....	14
4.1.2	Sistema de referencia terrestre	16
4.1.3	Sistema de referencia celeste	18
4.1.4	Marco de referencia terrestre	20
4.1.5	Marco de referencia celeste	21
4.1.6	SIRGAS	21
4.1.7	Modos de posicionamiento	23
4.1.7.1	Posicionamiento absoluto	23
4.1.7.2	Posicionamiento relativo	25
4.1.8	Redes de control y sus necesidades	26
4.2	GPS.....	30
4.2.1	Métodos.....	31
4.2.2	Observables GPS	32
4.2.2.1	Observable de código	33
4.2.2.2	Observaciones por fase.....	34
4.2.3	Correcciones y modelos.....	36
4.2.3.1	Ionosfera	36
4.2.3.2	Troposfera.....	37
4.2.3.3	Centros de fase.....	45
4.2.3.4	Mareas	46
4.3	Ajuste por mínimos cuadrados	52
5	Procesamiento de datos GNSS con Bernese	55
5.1	Reseña del software.....	55
5.2	Estructura del software.....	58

5.3	Correcciones de la posición del satélite	64
5.4	Sincronización de relojes	69
5.5	Líneas bases.....	70
5.6	Detección de saltos de ciclos.....	71
5.7	Resolución de ambigüedades	74
5.8	Ajuste y combinación de soluciones	77
6	Implementación práctica de una red GNSS para la ciudad de Los Ángeles.....	79
6.1	Región de estudio	79
6.1.1	Red global	79
6.1.2	Red Local	81
6.2	Metodología seleccionada para el estudio.....	82
6.3	Trabajo de campo	85
6.3.1	Instrumental	85
6.3.2	Planificación de terreno	86
6.3.3	Comentarios	89
6.4	Post procesamiento.....	90
6.4.1	Datos	90
6.4.2	Estrategia de procesamiento	92
7	Resultados y Análisis	100
7.1	Procesamiento triples diferencias de fase.....	100
7.2	Saltos de ciclo.....	103
7.3	Primeros residuales y soluciones flotantes.....	105
7.3.1	Primeros residuales	105
7.3.2	Solución flotante	107
7.4	Resolución ambigüedades.....	110
7.5	Solución final (combinación de soluciones)	112
7.6	Comparación red 2015	117
8	Conclusiones y recomendaciones	119
9	Referencias.....	122
10	Anexos	128

Lista de Tablas

Tabla 1 - Clasificación de redes según la precisión horizontal.....	29
Tabla 2 - Coeficientes de refractividad.....	40
Tabla 3 - Contribución de varios cuerpos celeste al potencial de marea.....	48
Tabla 4 - Muestra de un archivo de carga oceánica.....	50
Tabla 5 - Propagación de error de órbita en una línea base.....	65
Tabla 6 - Datos estaciones fiduciales.....	80
Tabla 7 - Datos del procesamiento.....	90
Tabla 8 - Triples diferencias sesión 1.....	100
Tabla 9 - Triples diferencias sesión 2.....	101
Tabla 10 - Saltos de ciclo sesión 1.....	103
Tabla 11 - Saltos de ciclo sesión 2.....	104
Tabla 12 - Resumen de los saltos de ciclo.....	104
Tabla 13 - Estadísticas primeros residuales sesión 1.....	105
Tabla 14 - Informe coordenadas residuales sesión 1.....	106
Tabla 15 - Estadísticas residuales sesión 2.....	106
Tabla 16 - Coordenadas residuales sesión 2.....	107
Tabla 17 - Estadísticas solución flotante sesión 1.....	108
Tabla 18 - Informe coordenadas solución flotante sesión 1.....	108
Tabla 19 - Estadísticas solución flotante sesión 2.....	109
Tabla 20 - Informe coordenadas solución flotante 2.....	109
Tabla 21 - Resolución de ambigüedades sesión 1.....	111
Tabla 22 - Resolución de ambigüedades sesión 2.....	111
Tabla 23 - Estadísticas solución final.....	112
Tabla 24 - Informe coordenadas solución final.....	113
Tabla 25 - Tolerancia de líneas bases.....	116
Tabla 26 - Comparación red 2015 de coordenadas.....	117
Tabla 27 - Comparación de líneas bases 2015.....	118

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de referencia terrestre	17
Figura 2 - Sistema de referencia celeste	19
Figura 3 - Estaciones SIRGAS/IGS.....	23
Figura 4 - Posicionamiento simple	25
Figura 5 - Posicionamiento relativo.....	26
Figura 6 - Modelo de Hopfield	39
Figura 7 - Modelo de Saastaimonen	41
Figura 8 - Muestra grilla VMF.....	44
Figura 9 - Esquema de la fuerza de marea Lunar	47
Figura 10 - Potencial de marea respecto a la Luna	48
Figura 11 - Interface Bernese.....	59
Figura 12 - Componentes Bernese.....	61
Figura 13 - Directorios de una campaña Bernese	62
Figura 14 - Orbitas de Kepler	67
Figura 15 - Ubicación estaciones SIRGAS.....	80
Figura 16 - Red Local.....	81
Figura 17 - Diagrama sesiones 2015.....	87
Figura 18 - Diagrama sesiones 2016.....	89
Figura 19 - Estrategia procesamiento Bernese.....	94
Figura 20 - rms vs distancia (sesión 1)	102
Figura 21 - rms vs distancia (sesión 2)	102
Figura 22 - Componente X rms	114
Figura 23 - Componente Y rms	115
Figura 24 - Componente Z rms	115

Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones

DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

GMM Gauss markov model

GNSS Global navigation satellite system

GPS Global position system

IAU International Astronomic Union

ICRF International Celestial Reference Frame

ICRS International Celestial Reference system

IERS International Earth Rotation Service

ITRF International Terrestrial Reference frame

ITRS International Terrestrial reference system

IUGG Union of Geodesy and Geophysics

MRC Marco de referencia celeste

MRT Marco de referencia terrestre

NMF Neill Mapping Functions

PCV Phase center variations

QIF Quasi Ionosphere- Free

RINEX receiver independent exchange format

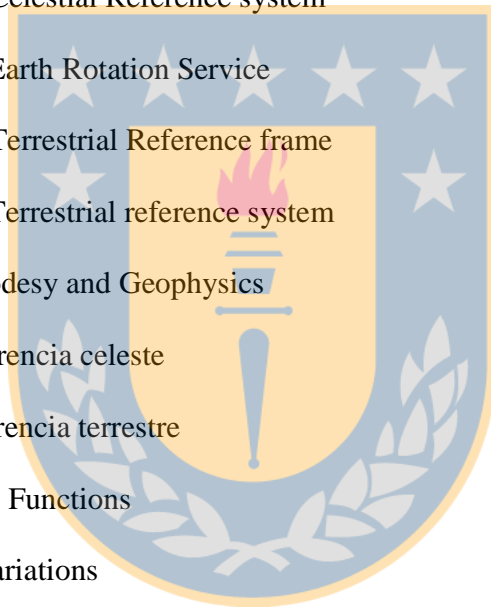
SIRGAS Sistema geocéntrico para las Américas

SLR Satellite laser ranging

SRG Sistema de referencia global

VLBI Very Long Baseline Interferometry

VMF Vienna Mapping Functions



1 Introducción

Una red de control geodésica, se compone de puntos estables e identificables, con valores de referencia publicados, los cuales son derivados de las observaciones que unen un conjunto de puntos (Bossler, 1984). Las redes geodésicas han contribuido en distintas labores, las cuales se destacan desde estudios científicos hasta obras de ingeniería.

A través de la historia, la topografía ha sido la disciplina encargada de la ejecución de las redes geodésicas, utilizando procedimientos clásicos como la triangulación o la trilateración, los cuales basaban sus observaciones en las mediciones de ángulos y distancias. Desde hace algunos años, la aparición de nuevas técnicas de medición han repercutido en el paradigma de la construcción de las redes geodésicas, las cuales en la actualidad son redes conformadas por estaciones de observación continuas. La evolución del instrumental utilizado para la implementación de las redes geodésicas, da origen a estructuras con exactitudes y precisiones antiguamente impensadas.

El presente caso de estudio, consiste en la estimación de coordenadas de una red geodésica de primer orden para la ciudad de Los Ángeles, basándose en la monumentación de una red de una campaña anterior (Flores, 2015), la cual destacaba por su exactitud en la componente altimétrica. El desafío es lograr una vinculación a un sistema de referencia, esto incluye una fase de captura de datos como también otra etapa de post procesamiento. En ellas, se elaborarán estrategias rigurosas de medición y se procesarán los datos con un software científico Bernese 5.2, de manera que se pueda tener un mejor control de las variables involucradas en el procesamiento de los datos y lograr la vinculación a un sistema de referencia global. La importancia de este trabajo

radica principalmente en contribuir a la ciudad de Los Ángeles con una red geodésica propia de alta precisión y multipropósito. De esta forma, Los Ángeles tendrá una red geodésica la cual estará a disposición de toda la comunidad, con la finalidad de que se puedan realizar próximos estudios vinculados a deformaciones, monitoreo, implementación de modelos para la mejora de la componente altimétrica, entre otros. Además, la materialización de esta estructura otorga un grado de identidad haciendo alusión a la carrera Ingeniería Geomática, la cual ha estado ligada a la ciudad desde los inicios de la Universidad de Concepción como sede en Los Ángeles. De esta manera, una de las carreras universitarias con mayor historia en Los Ángeles, contribuye una estructura de alta precisión para toda la comunidad.



2 – Objetivos

2.1 Objetivo General

- Estimar las coordenadas de una red GPS de alta precisión en la ciudad de Los Ángeles, con vínculo a Sistema Geodésico de Referencia (SGR) SIRGAS.

2.2 Objetivo específico

- Aplicar una estrategia en el proceso del software científico Bernese 5.2.
- Analizar los resultados de las soluciones GPS.
- Definir coordenadas y desviaciones estándar de la red.

3 Foco

De lo anterior, se deduce un establecimiento de una red GPS localizada en los alrededores de la ciudad de Los Ángeles, la cual contemplará procedimientos de terreno y

cálculo, con la finalidad de obtener resultados de calidad científica, y vincularla a un SGR global.

El estudio es llevado a cabo por medio de una campaña en donde se estudian nuevas estrategias de terreno y una labor de post proceso utilizando el software científico de procesamiento de datos, Bernese 5.2. En él, se estudiarán de forma detallada las variables involucradas en el procesamiento, implicando una mejora en el tratamiento de correcciones y metodologías, para llevar a un mejor resultado. Por último, se vincularán los resultados a un SGR global en una época de definición.



4 Marco teórico

4.1 Geodesia

La Geodesia es la geociencia más antigua de la Tierra (Vanicek & Krakiwsky, 2015). Hace ya algunos años la Geodesia era definida como "la ciencia de la medición y de la representación cartográfica de la superficie terrestre" (Helmert, 1884). Por otro lado, una definición un poco distinta, nos dice que "la Geodesia es la ciencia fundamental para la determinación del potencial gravitatorio" (Bruns, 1878).

Aunque por distintas que sean ambas definiciones, las dos recogen dos miradas o enfoques que tiene esta ciencia. En la primera definición, se habla de un enfoque acerca de las componentes geométricas y la segunda definición enfatiza la componente física. No obstante, se podría decir que ambas se pueden conmutar para dar una mirada de carácter global.

En la actualidad, se dice que la Geodesia " responde al problema de representar la figura , el campo gravitatorio externo de la tierra y otros cuerpos como una función de tiempo, por medio de observaciones realizadas dentro y fuera de estos cuerpos" (Torge, 2001). Sin lugar a dudas, esta es una definición que se adecúa a los nuevos tiempos, en donde el surgimiento y el aporte de la era satelital, en conjunto de la computación han modificado los clásicos métodos de captura de observaciones, alcanzando exactitudes impensadas en épocas anteriores, en donde además es posible modelar una serie de fenómenos propios de la Tierra.

Las disciplinas que integran a la Geodesia son diversas, estas se pueden agrupar en cuatro pilares; Geodesia física, Geodesia geodinámica, Geodesia matemática y Geodesia espacial (Álvarez, 2008).

De ellas la Geodesia física; estudios relacionados con la gravedad, la Geodesia geodinámica; aquella parte de la Geodesia que estudia el movimiento de las placas tectónicas, la Geodesia espacial; estudia las variaciones y rotaciones de la Tierra y la Geodesia matemática; se preocupa de la obtención específica de puntos con alta precisión, dentro del contexto que involucre formulaciones que puedan permitirlo.

La evolución de la Geodesia, se debe también al crecimiento de las distintas ciencias a fines que se encuentran estrechamente relacionadas, como la física, astronomía, computación, estadística y matemática.

La Geodesia ofrece aplicaciones que son fundamentales en la ingeniería, en donde se crean redes de control en fases previa de un proyecto, durante un proyecto, y luego en una etapa de posterioridad para el monitoreo de una obra. Por otro lado, también la Geodesia permite desarrollar estudios relacionados a la geodinámica, en donde se pueden estudiar deformaciones, como desastres naturales alusivos a los terremotos (Segall, 1997), volcanes (Dzurusin, 2006), y otros fenómenos como el ciclo hidrológico o el movimiento de placas.

4.1.1 Sistemas de referencia

Es importante decir que los términos sistema de referencia y marco de referencia, hacen alusión a conceptos distintos, en donde un sistema de referencia se refiere a la definición, y un marco de referencia a su realización.

Los sistemas de referencia son introducidos de manera que en conjunto a las observaciones que se toman, puedan representar de mejor manera una superficie o extensión de terreno determinado. Una definición de un sistema de referencia establece que, "Un sistema de coordenadas se define en términos de orientación métrica, orientación y curvatura, en donde se cumple el principio tridimensional" (Heitz, 1988). Otra definición dice que, "un sistema de referencia es un conjunto de convenciones que en conjunto son requeridas para modelar una terna de ejes en cualquier época" (Jekeky, 2006). Aunque en ambas definiciones hacen alusión al conjunto de convenciones, la definición más actual hace referencia a la época, incluyendo una variable dinámica en los sistemas de referencia.

Dentro de un sistema de referencia, se consideran acuerdos o convenciones para una serie de unidades básicas y constantes, como por ejemplo:

- El metro se considera la longitud de la parte en que viaja la velocidad de la luz por un intervalo de $1/199702458$ de un segundo.
- El kilogramo es la unidad de masa; ésta es igual al prototipo internacional de un kilogramo.
- El segundo es la duración de 919631770 periodos de la radiación emitida entre dos niveles hiperfinos de relojes de cesio.

Un punto en la superficie terrestre, es representado comúnmente por un sistema de coordenadas. Existen distintos tipos de sistemas de coordenadas, los cuales pueden clasificarse según:

- Origen: geocéntricas o topocéntricas.
- Tipo de coordenadas: Cartesianas o curvilíneas.

A grandes rasgos, existen dos sistemas de referencia de los cuales surgen distintas sub clasificaciones. Uno de ellos, es adecuado para la representación o caracterización de un punto de la superficie terrestre, el cual es conocido como Sistema de Referencia Terrestre (SRT). Ahora, si se amplía nuestra visión un poco más allá y se quisiera representar de alguna manera un cuerpo celeste dentro del espacio, quizá el mismo sistema anteriormente mencionado no sería el más adecuado, pues la representación quedaría condicionada por números de gran extensión lo cual dificultaría de gran manera su manipulación. Por ende, existe un Sistema de Referencia Celeste (SRC), el cual es más utilizado para labores astronómicas debido a su alcance de trabajo.

Ambos sistemas de referencia son fundamentales en la Geodesia, puesto que cada uno cumple un rol distinto, y donde es necesario comprender cada uno de sus alcances.

El *International Earth Rotation and Reference System Service* (IERS), es el servicio encargado de mantener los marcos de referencia celeste y terrestre. Cada uno de estos sistemas están bajo la recomendación de la *International Astronomical Union* (IAU) y la *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG). Además, el IERS también es responsable de los parámetros de orientación en función del tiempo para cada uno de los marcos (Seidelmann, 2005).

4.1.2 Sistema de referencia terrestre

"Un sistema de referencia terrestre es definido para obtener un posicionamiento sobre la superficie terrestre" (Torge, 2012). Comúnmente, un punto de la superficie terrestre es definido en tres dimensiones, en donde generalmente son utilizados los sistemas de coordenadas geocéntricos.

El IERS define un conjunto de convenciones para un *International terrestrial reference system* (ITRS), en ellos se especifica su origen, escala, orientación y su evolución de tiempo.

La orientación y origen del ITRS contempla:

- Un origen, en el centro de masa de la Tierra (geocentro).
- Un eje Z, con dirección desde el centro de masa de la Tierra hacia el polo medio convencional, por medio de un eje medio rotacional.
- Un plano ecuatorial medio es definido, el cual es perpendicular al eje Z y contiene a los ejes X e Y.
- Se define al plano XZ, el cual contiene el eje medio de rotación junto al ecuador medio.
- Un eje Y es definido a través de un sistema de mano derecha

Lo anterior es posible visualizar en la Figura 1:

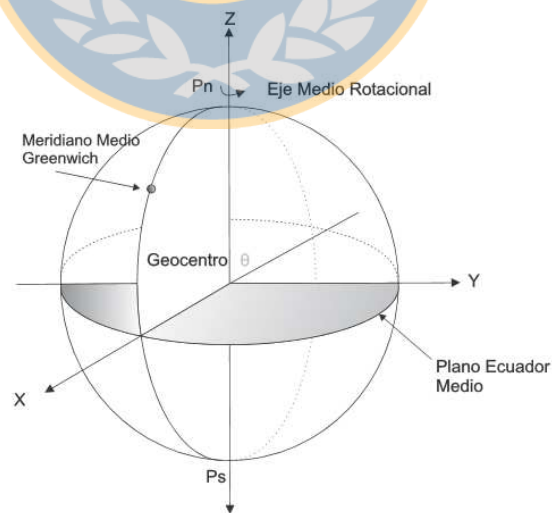


Figura1 - Sistema de referencia terrestre

4.1.3 Sistema de referencia celeste

A diferencia de un Sistema de Referencia Terrestre (SRT), un Sistema de Referencia Celeste (SRC) nace con la necesidad de representar de manera correcta el movimiento de la Tierra con respecto a los otros cuerpos celestes involucrados en el sistema solar.

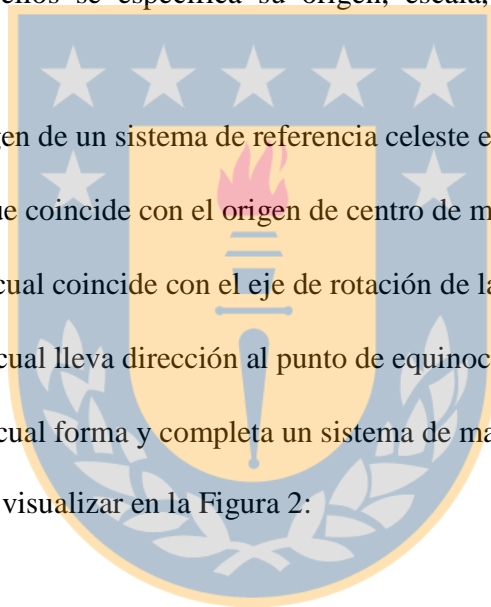
La representación también es llevada a cabo por un sistema de coordenadas, las cuales son definidas por un sistema esférico de astronomía (Mueller 1969, Eichnor 1974).

El IERS define un conjunto de convenciones para un *International Celestial Reference System* (ICRS), en ellos se especifica su origen, escala, orientación y evolución de tiempo.

La orientación y origen de un sistema de referencia celeste es provista de:

- **Un origen** que coincide con el origen de centro de masa de la Tierra (geocentro).
- **Un eje Z**, el cual coincide con el eje de rotación de la Tierra.
- **Un eje X**, el cual lleva dirección al punto de equinoccio Vernal.
- **Un eje Y**, el cual forma y completa un sistema de mano derecha.

Lo anterior se puede visualizar en la Figura 2:



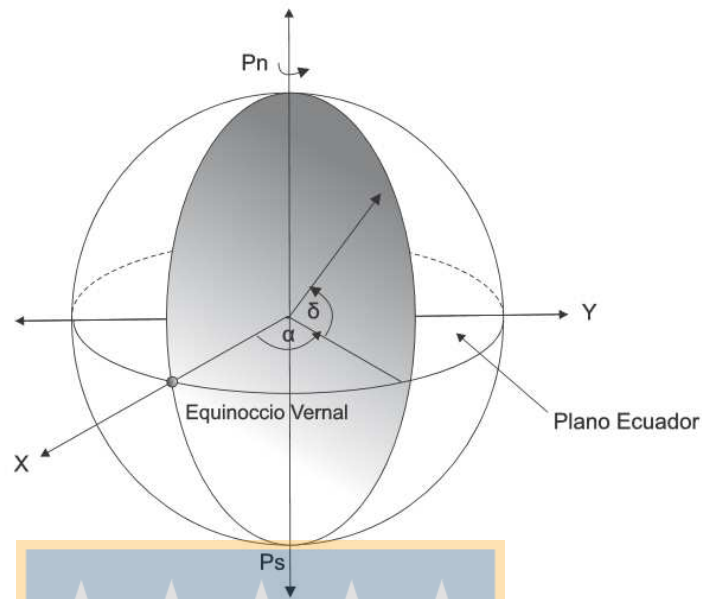


Figura 2 - Sistema de referencia celeste

A diferencia de un sistema de referencia geodésico terrestre, en donde la representación de algún punto de la superficie terrestre es caracterizado por un conjunto de coordenadas pertenecientes a un sistema geocéntrico. En un sistema de referencia geodésico celeste, es común que se utilice medidas angulares para la parametrización o representación de acuerdo a este sistema. Su utilización corresponde a una lógica de comodidad en conjunto a un uso práctico. Como consecuencia de esto, si se quisiera representar una estrella conforme a un sistema de coordenadas geocéntrico, se obtendría como resultado un número con bastantes dígitos, lo cual se traduce en una forma poco eficiente de manipular los datos.

Por ello, se utiliza un sistema esférico que pueda representar algún objeto determinado conforme a una parametrización angular. A consecuencia de esto, se obtiene la siguiente parametrización para representar los cuerpos celestes:

- **α Ascensión recta:** Es el ángulo medido en el plano del Ecuador entre los planos del cuerpo celeste determinado y el punto de equinoccio vernal.
- **δ Declinación:** Es el ángulo medido entre el plano ecuatorial y el objeto o cuerpo celeste determinado.

4.1.4 Marco de referencia terrestre

"Haciendo un poco de historia y retrocediendo 20 o más años, los marcos de referencia eran locales, ofreciendo una solución exclusivamente regional" (Oberti, 2005). Hoy en día con la utilización de nuevas técnicas y metodologías, éstas permiten que sus soluciones den paso a marcos globales, en donde la implementación de los *Global Navigation Satellite System* (GNSS) fue esencial.

Un Marco de Referencia Global, es realizado por el IERS a través de las distintas observaciones geodésicas en sitios determinados en toda la superficie terrestre.

Un reporte anual del marco de referencia terrestre es entregado por el IERS, de manera que este puede realizar un procesamiento asignando unas determinadas coordenadas de los puntos correspondientes a las estaciones fiduciales involucradas en el procesamiento. Estas coordenadas quedan sujetas a una época determinada.

La precisión de los resultados de los procesamientos depende básicamente de las técnicas de observación, tales como GNSS, SLR, DORIS, VLBI, entre otras, las cuales permiten conseguir un mejor resultado vinculado a la exactitud, esto consecuencia de la combinación de las distintas técnicas de precisión escogidas para observar una determinada grandeza.

4.1.5 Marco de referencia celeste

"Un marco de referencia celeste basa su realización a través de la dirección hacia fuentes de radio intergalácticas "(Mueller,1989).

Bajo esta premisa, se tiene el catálogo fundamental FK5 (Fricke et al,1988), el cual provee la posición de los distintos cuerpos celestes de acuerdo a sus medidas angulares, es decir, en función de la declinación y la ascensión recta. Además, dicho catálogo provee para un cierto periodo un apropiado movimiento, los cuales están definidos para la época J2000.0 (Torge, 2012).

La realización ha sido implementada por misiones espaciales astronómicas. Entre ellas destaca el HIPPARCOS, el cual fue usado para construir un larga red de aproximadamente 100000 estrellas, y que son las resultantes del catalogo FK5. Actualmente existe un catálogo FK6 que es básicamente una actualización del FK5.

4.1.6 SIRGAS

El Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS) nace el año 1993, bajo el nombre de Sistema geocéntrico para América del Sur, y que básicamente señala que su misión es densificar el *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) en América del Sur (Brunini, 2007).

El nombre inicial de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) fue cambiado en febrero de 2001 a Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas, dada la extensión del marco de referencia (SIRGAS2000) y la recomendación de la Organización de las Naciones Unidas en su Séptima Conferencia Cartográfica de las

Américas (Nueva York, enero 22 al 26 de 2001) sobre la adopción de SIRGAS como sistema de referencia oficial en todos los países de Las Américas.

SIRGAS provee el soporte necesario para el desarrollo y combinación de todo tipo de actividades prácticas y científicas relacionadas con la determinación precisa de coordenadas, navegación, investigación en geociencias y aplicaciones multidisciplinarias en América. En particular, SIRGAS se constituye en la capa fundamental de la infraestructura de datos espaciales en el continente y ofrece apoyo permanente al Comité Regional de las Naciones Unidas sobre la Gestión de Información Geoespacial para Las Américas (UN-GGIM: Américas), cuyo objetivo inmediato es dar resoluciones sobre el Marco Geodésico Global de Referencia para el Desarrollo Sostenible, emanada de la Asamblea General de las Naciones Unidas el 26 de febrero de 2015.

Su definición es idéntica al ITRS y su realización es una densificación regional del ITRF. Además del sistema de referencia geométrico, SIRGAS se ocupa de la definición y realización de un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales como componente geométrica y en números geopotenciales como componente física.

Las estaciones GNSS de operación continua que están integradas de manera oficial a SIRGAS sobrepasan las 450 en todo el continente Americano, de las cuales unas 60 son estaciones del *International GNSS Service* (IGS).

Esta red es denominada como SIRGAS-CON y es semanalmente calculada y sus coordenadas a la época de observación están en el mismo sistema que las orbitas satelitales finales proporcionadas por el IGS. La solución se asocia a modelos de velocidades y coordenadas, de los cuales se establece su error de acuerdo al ajuste realizado. Las soluciones multianuales están referidas al ITRF vigente a una época

especifica. Actualmente, está disponible un modelo de velocidades (VEMOS2015), el cual fue calculado con datos posteriores a los terremotos de Chile y México de 2010. El modelo entregado fue a partir de un procesamiento de estaciones continuas en América del Sur tomando en cuenta las 456 estaciones, ver Figura 3.

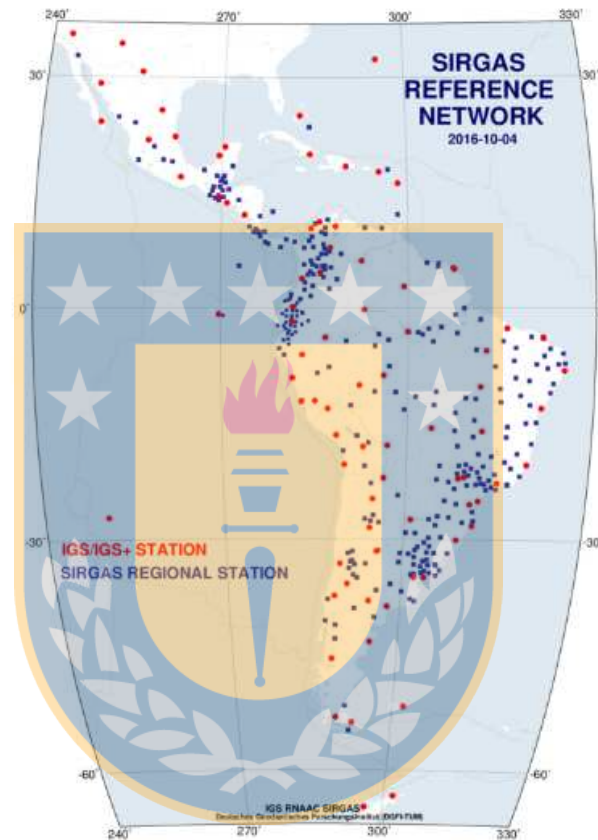


Figura 3 - Estaciones SIRGAS/IGS

Fuente: www.sirgas.org

4.1.7 Modos de posicionamiento

Los modos de posicionamiento descritos responden a la clasificación realizada por Gopi (2005). En la clasificación se establece un posicionamiento absoluto y otro relativo.

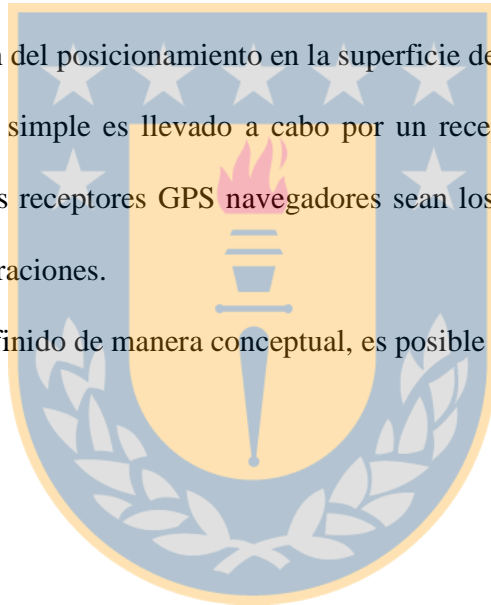
4.1.7.1 Posicionamiento absoluto

"El posicionamiento absoluto implica el uso de sólo receptor en una estación para recopilar datos de múltiples satélites, esto con la finalidad de determinar la ubicación de la estación. No es lo suficientemente preciso para un levantamiento preciso. Sin embargo, es el método de posicionamiento GPS militar y comercial más utilizado para la navegación en tiempo real y la determinación de la ubicación" (Gopi, 2005).

Para este tipo de posicionamiento a menudo es necesario un mínimo de 4 satélites de rastreo, con efectos de eliminar los errores producidos por los errores de los relojes. Su utilización es característica con fines de navegación, o en situaciones que se requiera una rápida determinación del posicionamiento en la superficie de la Tierra.

Un posicionamiento simple es llevado a cabo por un receptor, en este sentido se hace característico que los receptores GPS navegadores sean los instrumentos más utilizados para este tipo de operaciones.

Lo anteriormente definido de manera conceptual, es posible visualizarlo en Figura 4.



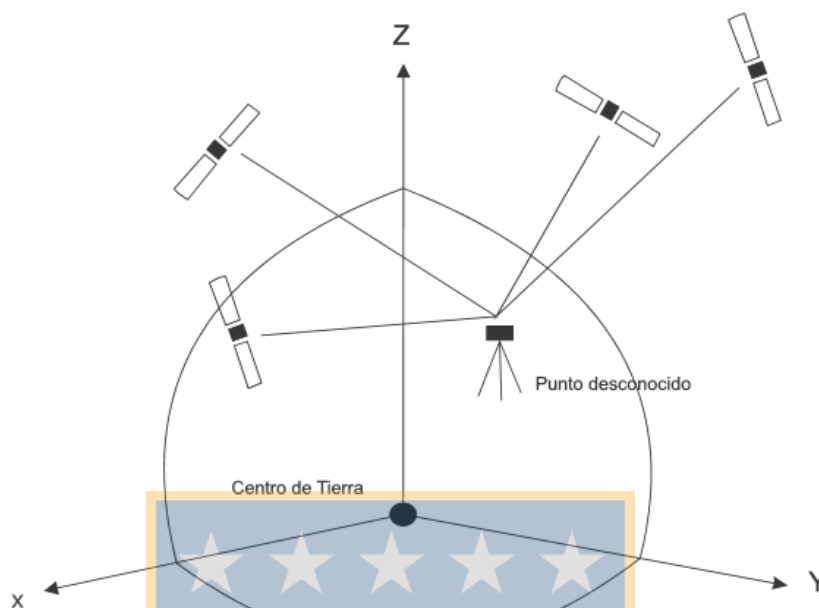


Figura 4 - Posicionamiento simple

4.1.7.2 Posicionamiento relativo

"El posicionamiento absoluto no proporciona las precisiones necesarias para la mayoría de los proyectos, esto debido a errores existentes e inducidos. Con el fin de eliminar estos errores y obtener mayores precisiones, se puede utilizar un modo de posicionamiento relativo" (Gopi, 2005)

En el posicionamiento relativo las coordenadas de un receptor en un punto desconocido, es buscada con respecto a un receptor en un punto conocido. La ventaja de utilizar el posicionamiento relativo, es que se logran precisiones mucho más altas porque la mayoría de los errores de observación GPS son iguales tanto en el sitio conocido, como en el sitio desconocido, con ello se reducen los errores en el procesamiento de datos. (Figura 5)

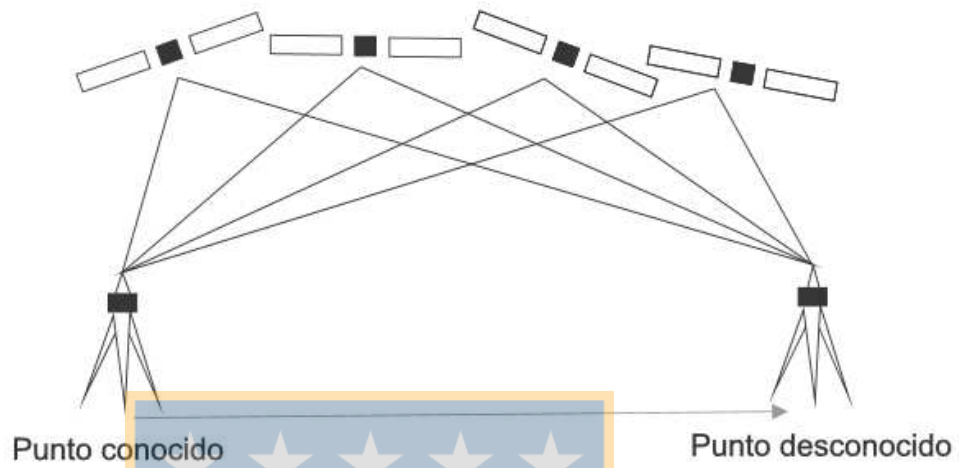


Figura 5 - Posicionamiento relativo

4.1.8 Redes de control y sus necesidades

" Una red topográfica, se define como una figura formada por una constelación de puntos distribuidos con cierta simetría en el territorio, y enlazados entre sí por las visuales correspondientes, proyectada sobre un elipsoide de revolución que se emplea como superficie de referencia" (Gamboa, 2006).

Si bien es cierto, esta definición representa más bien una definición clásica de una red topográfica, ya que en ella se especifica la inter visibilidad entre los puntos o vértices de la red. Hoy en día con el conocimiento de nuevas técnicas para la captura de datos, ya no es un tema tan relevante.

De cierta manera, los GNSS han irrumpido el paradigma clásico de las redes topográficas, de manera que ya no se necesita una inter visibilidad entre los vértices de la red. La inclusión de esta nueva tecnología repercute de una manera significativa en el

rendimiento en la fase de captura de datos, como también en la calidad y fiabilidad de los resultados. No obstante, surgen nuevas interrogantes en materia del procesamiento de los datos.

Actualmente, se dice que una red geodésica "es una estructura de consistencia estable, en la que se identifican los valores de referencia de los puntos publicados y que son derivados de observaciones que unen el conjunto de puntos "(Bossler,1984). Claramente, se establece una definición que engloba las técnicas GNSS, de manera que también por otro lado representa mejor lo que hoy en día es una red geodésica.

Con el paso de los años, se han visto las mejoras en las precisiones de las redes geodésicas, así como también, las distintas aplicaciones que se han ido desarrollando en base estas.

Las redes geodésicas han sido necesarias para las labores de la representación del territorio, actuando como estructuras de control en la fotogrametría y dando apoyo a la cartografía. Conforme a esto, los países han necesitado de redes geodésicas para la elaboración de una cartografía coherente con la finalidad de delimitar sus límites geográficos, así como también, para la planificación de un gran número de actividades relacionadas a lo económico, social y militar de un país. En una mayor escala, las municipalidades hacen uso de la cartografía para la elaboración de instrumentos de planificación territorial, como los actuales planos reguladores comunales, en donde se especifica una cierta normativa que hace referencia a un determinado uso de suelo. Esto permite la planificación de zonas con potencial para la ganadería, agricultura, uso industrial, u otro uso que tenga por objetivo buscar la máxima optimización del territorio. En el ámbito militar, las redes geodésicas son fundamentales para el conocimiento del

propio territorio, de manera que pueda ser aprovechado para actividades relacionadas a la defensa de un país. En este ámbito, es quizás donde proviene el mayor interés por incluir mejoras, en donde tal es la importancia que se le ha dado, que en gobiernos como en U.SA se han destinado grandes recursos para la elaboración de programas como GPS.

Adicionalmente, las redes geodésicas permiten llevar a cabo proyectos de ingeniería como el emplazamiento de carreteras, obras vinculadas a la minería, construcciones aeroportuarias, desarrollos de túneles, apoyos fotogramétricos, entre otros. De modo que una red geodésica es la columna vertebral de una obra civil .

Todo proyecto, debe necesariamente empezar por la construcción de las estructuras geodésicas. En consecuencia de esto, toma relevancia la precisión y el orden de la red, las cuales apuntan a cumplir ciertas especificaciones correspondientes. El cumplimiento de las especificaciones de una red, tiene directa relación con el éxito de una obra. Caso contrario, se afirma que una red deficiente trae consigo al fracaso.

Ninguna de las aplicaciones mencionadas son posibles de realizar sin una estructura geodésica adecuada.

Las aplicaciones de las redes geodésicas no sólo están orientadas a la representación del terreno y a las obras civiles. Una red geodésica puede ser utilizada para estudios o investigaciones, las cuales pueden estar relacionadas al estudio de deformaciones; modelado de la ionosfera ; modelado de troposfera ; modelado de vapor de agua; estudios de modelado de la componente altimétrica; estudios de nuevas metodologías, etc.

En la actualidad existen varios tipos de redes geodésicas. No obstante, estas se pueden clasificar según su:

- Geometría: Horizontal y/ o vertical.
- Marco de referencia.
- Precisión y orden.

La siguiente clasificación (Tabla 1), viene de las especificaciones geodésicas de Bossler (1984) , las cuales hacen relación a las redes de control horizontal:

Tabla 1- Clasificación de redes según la precisión horizontal

Clasificación	Mínimo estándar de precisión
Primer orden	1:100 000
Segundo orden, clase I	1:50 000
Segundo orden, clase II	1:20 000
Tercer orden, Clase I	1:10 000
Tercer orden, clase II	1:5 000

Fuente: Bossler,1986

Una precisión de 1: a , es calculado de acuerdo a la desviación estándar de un ajuste por mínimos cuadrados en (1):

$$a = d/s$$

(1)

En donde:

s = Desviación estándar calculado entre líneas bases, obtenido por un ajuste de mínimos cuadrados.

d = Distancia entre los puntos.

4.2 GPS

En la década de 1970, acontece el nacimiento del primer sistema de navegación basado en señales de satélites, el cual se sitúa en el contexto de trabajos militares para U.S.A. La constelación NAVSTAR (*Navigation Satellite Timing and Ranging System*), era un sistema que proporcionaba la posición en tres dimensiones, para usuarios debidamente equipados y sin importar las condiciones climáticas. Su aceptación fue bien recibida, tanto así que las aplicaciones encontradas para el ámbito militar se extiende a aplicaciones geodésicas (Seeber,2003)

Hoy en día, distintos países han implementado distintos tipos de sistemas de navegación. Se tiene el caso de Glonass en Rusia, Galileo en Europa, Baidu en China, entre otros. Además se han implementados sistemas de aumentación de la precisión, para mejorar la eficiencia en ciertas zonas geográficas. Sin embargo, *Global Psitiong System* (GPS) es considerado como el sistema más estable y en el que se basan gran parte de los estudios y mediciones geodésicas.

Los comienzos de GPS señalan un desarrollo de 11 prototipos conocidos como "Block I" , los cuales fueron lanzados desde la fuerza aérea de Vanderberg en California entre Febrero de 1978 y Noviembre de 1985.

Luego del lanzamiento de los primeros prototipos de satélites para GPS, fueron inyectados al proyecto nuevos tipos de prototipos, haciendo claramente referencia a atender a ciertas mejoras. Nueve " Block II" fueron lanzados entre 1989 y 1990, seguidamente vienen 19 satélites "BLOCK IIA" lanzados entre 1990 y 1997 , después fueron lanzados 12 satélites "Block IIR" lanzados entre 1997 y 2004, desde el 2009 se

empiezan a lanzar los 8 prototipos de satélites "Block IIR-M" y actualmente se han lanzado 12 prototipos "Block IIF".

Hoy en día se encuentran 3 satélites en órbita, con 31 en operación. De ellos; 12 pertenecen a los prototipos Block II R, 7 Block II RM y 12 Blok IIF.

Técnicamente, los satélites GPS garantizan una disponibilidad de 24 satélites el 95% de las veces. Estos se encuentran divididos en 6 planos orbitales que van desde la letra A hasta la letra F, los cuales además tienen una inclinación de 55° con respecto al plano del Ecuador. Su altura aproximada es de 26 299.7 km de la superficie terrestre.

GPS posee una estructura clara y definida con respecto a lo operacional. De ella se describen tres tipos de segmentos:

- Segmento usuario: Se componen de todos los equipos que son capaces de recibir señales de satélites GPS.
- Segmento espacial: Se compone de la constelación de satélites que transmiten señales al usuario
- Segmento control: Consta de una red global de control en Tierra, la cual realiza funciones tales como; monitoreo, mantenimiento y actualización .

4.2.1 Métodos

Un modo de posicionamiento relativo corrige gran parte de los errores por GPS. De este modo de posicionamiento, surgen tres distintas metodologías prácticas que son utilizadas habitualmente. El método estático, cinemático y diferencial (Berrocoso et al., 2003).

Método estático: Consiste en realizar observaciones de los satélites GPS con receptores estacionados en los vértices geodésicos. Usualmente, es utilizado en redes de primer orden.

Método cinemático: "Se ocupa de la determinación de coordenadas, en instantes sucesivos, de posiciones ocupadas por un móvil terrestre, marítimo o aéreo. Este método consiste en una estación fija de coordenadas conocidas y un receptor a bordo del objeto móvil" (Berrocoso et al., 2003).

Método diferencial: Consiste en el cálculo de coordenadas de estaciones fijas o móviles, mediante una estación fija conocida y con coordenadas absolutas.

El método estático y cinemático se caracteriza por recibir las correcciones en un post procesamiento. Por otro lado, el método diferencial se caracteriza por corregir en tiempo real.

4.2.2 Observables GPS

Las metodologías y ecuaciones para obtener la posición de los puntos por medio de GPS son conocidas. A continuación se describirá un desarrollo basado en Seeber (2003).

Se considera que las mediciones GPS, se basan prácticamente en la medición de tiempo desde el satélite hacia el receptor, en donde la observable puede ser una fase, o un código.

Dicho esto, existe formulaciones matemáticas que sirven para determinar la distancia entre un satélite y un receptor, de manera que se elimine las principales fuentes de error.

Sin embargo, estas formulaciones son ayudadas con algoritmos desarrollados con la función de eliminar fuentes de error, tal como lo es el posicionamiento relativo. Este

posicionamiento consiste en obtener puntos de coordenadas desconocidas a través de la diferenciación con respecto a una coordenada conocida. Esto se describe en ecuación (2).

$$X_B = X_A + d_{AB};$$

$$d_{AB} = \begin{bmatrix} XB - XA \\ YB - YA \\ ZB - ZA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}$$

(2)

4.2.2.1 Observable de código

La observable de código se basa en la pseudodistancia, la cual es la medida de la distancia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de las señales, obtenida a partir del tiempo de vuelo de la señal multiplicado por la velocidad de la luz. El tiempo de vuelo de la señal se obtiene mediante código generado por el receptor y el idéntico emitido por el satélite (Berrocoso et al., 2003).

La ecuación (3) fundamental de las observaciones de código es:

$$p_i = |X_i - X_B| + cdt_u = c\tau_i = \sqrt{(X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2} + cdt_u$$

(3)

p_i : Distancia geométrica entre la antena del satélite S_i y la antena del receptor B

X_i Posición del satélite.

X_B Posición del receptor.

τ_i Observación del tiempo de la señal observada entre la antena de satélite y la antena del receptor.

cdt_u error de sincronización del reloj entre sistema de tiempo GPS y reloj de receptor

c : velocidad de propagación señal de la luz

La ecuación (4) puede ser ampliada en su desarrollo, agregando otras fuentes de errores. Así, se tiene:

$$p_i = \sqrt{(X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2} + cdt_u + cdt_a + cdt_s + \varepsilon_R \quad (4)$$

cdt_a : Retraso atmosférico de la señal. (este efecto hace referencia específicamente a un retraso ionosférico y troposférico, el cual se detallará más adelante)

cdt_r : Error del reloj del satélite con respecto al tiempo GPS.

ε_R : Ruido en el código.(Seeber,2003)

4.2.2.2 Observaciones por fase

"La medida de la fase de la portadora resulta de la comparación de la fase de la señal portadora recibida en el receptor y la generada por el oscilador de dicho receptor" (Berrocoso et al., 2003).

Debido a la mayor frecuencia de la portadora de fase en relación a los códigos emitidos, se permite mayor una mayor precisión en la medida de la distancia receptor-satélite que la pseudodistancia (código), esto aunque la medida de la fase está afectada por el desconocimiento del número de ciclos emitidos por el satélite hasta que el receptor adquiere la señal.

Cero diferencia de fase

Basado en Seeber (2003), la ecuación (5) de cero diferencia de fase es:

$$\Phi = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + \varepsilon_R + c \left(\frac{N}{f} \right) \quad (5)$$

En donde:

R : Distancia geométrica de la antena del satélite al receptor.

N : ambigüedades.

f : frecuencia de la portadora.

ε_R : Ruido de observación.

Simples diferencias

Siguiendo la siguiente nomenclatura:

$\Delta =$ diferencia de un receptor j con un receptor i

$\nabla =$ diferencia de un satélite q con un satélite p

$\delta =$ diferencia de una época 2 con una época 1

Con esto, y haciendo referencia a la ecuación de cero diferencias de fase (5), las simples diferencias vendrían dada por (6):

$$\Delta\Phi = \Delta R + c\Delta t_u - \Delta d_{\text{ion}} + \Delta d_{\text{trop}} + \varepsilon_{\Phi} + \lambda\Delta N \quad (6)$$

En donde:

El retraso atmosférico es descompuesto entre ionosfera y troposfera

d_{ion} : Diferencia ionosférica.

Δd_{trop} : Diferencia troposférica.

ε_{Φ} : Ruido de la cero diferencia.

λ : Longitud onda portadora.

En esta ecuación el error del satélite ya no se considera. (Seeber, 2003)

Dobles diferencias

La doble diferencia es la diferenciación entre las simples diferencias (6). Dicho esto, se tiene la ecuación de dobles diferencias de fase (7):

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta R - \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trop} + \varepsilon_{\Delta\Phi} + \lambda\nabla\Delta N \quad (7)$$

Con su formulación, es notoriamente visible la cancelación del error de la sincronización del reloj del receptor. Habitualmente, las dobles diferencias de fase son utilizadas para procesar de manera más precisas las observaciones de fase. (Seeber , 2003)

Triples diferencias

La triple diferencia de fase es una diferenciación de las dobles diferencias de fase (7).

Así entonces, se tiene la ecuación de triple diferencia de fase (8):

$$\delta\nabla\Delta\Phi = \delta\nabla\Delta R - \delta\nabla\Delta d_{ion} + \delta\nabla\Delta d_{trop} + \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi} \quad (8)$$

En las dobles diferencias se basa en que dos satélites son captados por dos receptores, pero en una época. Acá en cambio la diferenciación viene dada por dos épocas.

Una de las características de las triples diferencias de fase, es la cancelación de las ambigüedades. esto permite que se utilicen las triples diferencias de fase para encontrar errores groseros o saltos de ciclos

4.2.3 Correcciones y modelos

4.2.3.1 Ionosfera

El efecto de la ionosfera es el resultado de las señales de onda electromagnéticas GPS, las cuales viajan a través de una atmosfera de dispersión hacia la antena.

El efecto es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de las señales. Sin embargo, estos pueden ser removidos al tener dos frecuencia en las observaciones.

Modelos ionosféricos

Hay pocos modelos ionosféricos disponibles para estimar el efecto ionosférico. Algunos ejemplos, son el modelo ionosféricos de placas, el modelo de retraso al coseno y el modelo ionosférico de punto. Los coeficientes para el modelo del coseno incluye un mensaje de navegación que compensa aproximadamente un 50% del retraso. Más detalles se pueden encontrar en Leick (2004).

Funciones de observables

Los efectos de la ionosfera en el análisis de GPS pueden variar dependiendo de muchos factores. Tales factores incluyen variaciones geomagnéticas, ubicación espacial, la composición química atmosférica superior, la temperatura, la circulación del viento, la duración del ciclo de manchas solares, estación, hora del día, y la línea de visión.

Dado que el efecto ionosférico es una función de la frecuencia de una señal, tener datos de frecuencia dual puede eliminar casi todos los efectos ionosféricos (Musman et al., 1998).

4.2.3.2 Troposfera

La troposfera puede ser dividida en dos componentes; la componente húmeda y la componente seca. La componente seca, está conformada mayoritariamente por gases secos, mientras tanto por otro lado la componente húmeda está conformada en su mayoría por vapor de agua. Ambas componentes causan el retraso de la señal, en donde el aporte de la componente seca es del 90% del total de la refracción atmosférica (Leick, 2004).

Es importante señalar que el retraso troposférico no puede ser eliminado vía observaciones de doble frecuencia.

La parte del retraso troposférico puede ser definido como:

$$T_K^P = \int [n(r) - 1] \csc \theta(r) dr + \left[\int \csc \theta(r) dr + \int \csc \epsilon(r) dr \right] \quad (9)$$

Donde r es el radio geocéntrico, n es el índice de refracción, luego θ y e , se refieren a la elevación del ángulo del satélite refractada como no refractada; n se relaciona a la refractividad troposférica, la cual viene dada por:

$$N^{trop} = (n - q) * 10^{-6} \quad (10)$$

Modelos troposféricos

Debido a la significancia de los efectos troposféricos en la propagación de la señal, existen muchos estudios que corrigen estos efectos, los cuales se materializan en modelos. Adicionalmente, las funciones de mapeo ("*mapping functions*") ilustran el retraso de la señal en función del ángulo de elevación dado. Con ello se describen algunos modelos y funciones de mapeo, las cuales son de uso frecuente.

Modelo de Hopfield

El modelo de Hopfield (Hopfield, 1969), es un modelo troposférico empírico desarrollado en el año 1969 utilizando los datos de todo el mundo. En este modelo se describe la componente húmeda con una altitud de 11 km y la componente seca con una altitud de 40 km.

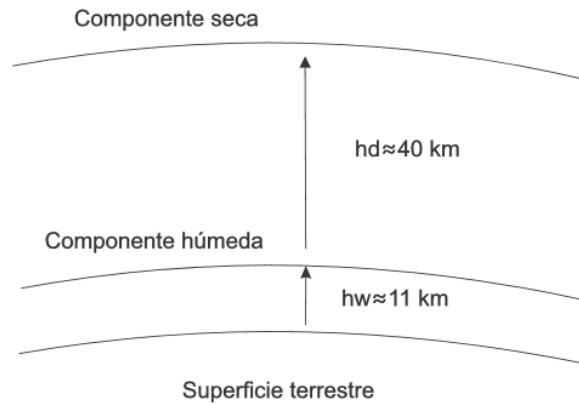


Figura 6 - Modelo de Hopfield

En base a la altura h hacia la superficie de la Tierra, el modelo de Hopfield puede ser descrito matemáticamente como:

$$N_d^{Trop} = N_{d,0}^{Trop} \left[\frac{H_d - h}{H_d} \right]^m$$

$$N_w^{Trop} = N_{w,0}^{Trop} \left[\frac{H_d - h}{H_w} \right]^m$$

(11)

En donde:

$m = 4$ Potencial empírico determinado de la altura de radio.

$H_d = 40136 + 148.72 (T_0 - 273.16)$. Un espesor politrópico para la parte seca (m).

$H_w = 11000$. Un espesor politrópico para la parte húmeda (m).

$N_{d,0}^{trop} = k_1 \frac{P_0}{T_0}$. Refracción troposférica Seca por la estación a una superficie de la Tierra.

como función de presión(milibar) y temperatura (° Kelvin).

$N_{w,0}^{trop} = k_2 \frac{e_0}{T_0} + k_3 \frac{e_0}{T_0}$ Refracción troposférica húmeda por la estación a una superficie.

de la Tierra como función de vapor de agua, presión y temperatura.

T_0 : Temperatura de la estación de chequeo (°k).

P_0 : Presión de la estación de chequeo (milibar).

$e_0 = 0.0611 RH 10^{\frac{7.5(T_0-273.15)}{237.3+T_0-273.15}}$. Vapor de agua , en donde RH es la humedad relativa expresada en porcentaje.

Los valores k_1, k_2 y k_3 , se expresan en la Tabla 2:

Tabla 2- Coeficientes de refractividad

Coeficientes de refractividad	Smith y Weintraub (1953)	Thayer (1974)
K1 (K/mb)	77.61+-0.01	77.604+- 0.014
K2 (K/mb)	72+-9	64.79+-0,08
K3 (K^2/mb)	$(3.75 + -0.03) 10^5$	$(3.776 + -0.004) 10^3$

Fuente: (Witchayangkoon, 2000)

Modelo de Saastamoinen

Saastamoinen (1971) aplica la ley de Gladstone y Dale (Witchayangkoon, 2000). Esto implica el pensamiento de la atmósfera en forma de una mezcla de dos gases ideales, el aire seco y vapor de agua (Witchayangkoon, 2000).

La temperatura en la troposfera desde el nivel del mar hasta unos diez kilómetros disminuye con la altura a una velocidad bastante uniforme, que varía ligeramente con la latitud y la estación, aunque en las regiones polares hay una inversión permanente en la troposfera inferior, donde las temperaturas reales inicialmente aumentan con la altura

Saastamoinen divide la atmósfera seca en dos capas: una capa de troposfera se extiende desde la superficie a una altura de aproximadamente 11 a 12 km, y la otra continua de la troposfera a aproximadamente 50 km, como se muestra en la Figura 7 , luego el vapor de agua atmosférico se limita sólo a la troposfera.

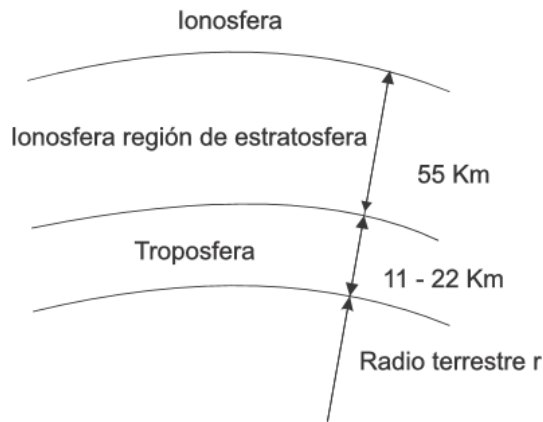


Figura 7 - Modelo de Saastaimonen

Para las condiciones normales de latitudes medias, el modelo Saastamoinen se da en unidades de metros como:

$$T_k^P = 0.002277 \sec z \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - \Omega \tan z^2 \right] \quad (12)$$

En donde:

z es la distancia verdadera cenit,

P_0 es la presión en la estación observado

T_0 es la temperatura de la estación de rastreo

$e_0 = 0.0611 RH 10^{\frac{7.5(T_0 - 273.15)}{237.3 + T_0 - 273.15}}$, que es básicamente un término recomendado por el IERS

para calcular el vapor de agua. En donde RH es la humedad relativa observada por la estación y expresada en porcentajes.

Ω el coeficiente:

$$\Omega = \frac{R}{rg} \left[\frac{P_0 T_0 - (Rb/g) P^0 T^0}{1 - (Rb/g)} \right] \quad (13)$$

R es la constante de los gases, r es el radio de la tierra. Además P^0 y T^0 son la presión y la temperatura en la parte inferior de la estratosfera. b es el gradiente vertical de la temperatura (dT / dh).

Funciones de Mapeo

Las funciones de mapeo describen el retraso de la señal según la dependencia del ángulo de elevación (Niell, 1996). El retraso cenital en conjunto a las funciones de mapeo, son utilizados para modelar la línea de retraso de la señal.

Generalmente, estas funciones se encuentran asociadas a parámetros como temperatura, presión y humedad relativa. No obstante, hay funciones de mapeo que están en función de la latitud y la altura sobre el nivel del mar. Una comparación de las funciones de mapeo es posible encontrar en Mendes (1988).

El retraso troposférico total puede ser descrito como:

$$t_a(E) = t_h^z m_h(E) + t_w^z m_w(E) \quad (14)$$

Donde el retraso troposférico total t_a , de un ángulo de elevación de la observación sin refractar E , es considerada. Los símbolos t_h^z , t_w^z , m_h y m_w son los retardos cenitales y funciones de mapeo de las componentes atmosféricas secas y húmedas, respectivamente.

Función de mapeo de Niell

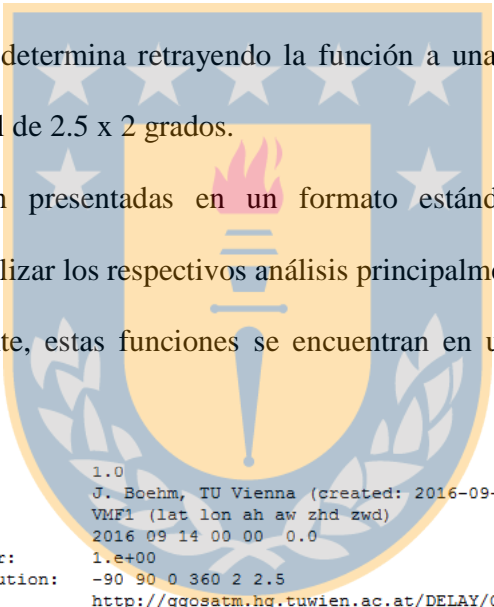
Esta es otra función de mapeo, la cual fue desarrollada por Niell (1996). Él propuso una nueva función de mapeo (*Niell Mapping Functions*, NMF) en base a los cambios temporales en conjunto a la ubicación geográfica y no en los parámetros meteorológicos de superficie. Sostuvo que todas las funciones de mapeo disponibles previamente han sido limitadas en su exactitud por la dependencia de la temperatura de la superficie, lo que hace tres dilemas. Todos estos son porque hay más variabilidad en la temperatura en la capa límite atmosférica, de la superficie de la Tierra hasta 2000 m. En primer lugar, las alteraciones diurnas de la temperatura de la superficie causan variaciones mucho menores que las calculadas a partir de las funciones de mapeo. En segundo lugar, los cambios estacionales en la temperatura de la superficie son normalmente más grandes que los cambios de la atmósfera superior (pero los rendimientos calculados función de mapeo artificialmente grandes variaciones estacionales). En tercer lugar, la función de mapeo calculada para los días de verano en frío no puede diferir significativamente de los días cálidos de invierno. Por ejemplo, las funciones de mapeo reales son muy diferentes de los valores reconstruidos debido a la diferencia en las tasas de caducidad y las alturas de la troposfera

Las nuevas funciones de mapeo se han derivado de los perfiles de temperatura y humedad relativa, que son en algunos promedios de sentido más de las regiones geográficas ampliamente variables. De acuerdo a esto, se obtienen unos coeficientes ajustados que hacen referencia a una tabla de valores empíricos para modelar la componente húmeda y seca.

Funciones de mapeo de Viena ("Vienna Mapping Functions")

En los últimos años, se han desarrollado las "Vienna Mapping functions (VMF)", las cuales tienen o apuntan como base datos numéricos climáticos, provenientes del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Las funciones se basan en los modelos empíricos similares al modelo de NMF, en donde los datos de entrada son el día del año, la latitud, longitud y la altura, que también hacen relación a las "Global mapping functions" (GMF). Para este caso, algunos coeficientes ajustados son determinados siguiendo la forma fraccionaria continua, mientras que una de ellos (coeficiente "a"), se determina retrayendo la función a una elevación de 3°. Las VMF provee una red global de 2.5 x 2 grados.

Estas funciones son presentadas en un formato estándar, las cuales pueden ser descargadas, para realizar los respectivos análisis principalmente para GNSS como para DORIS. Generalmente, estas funciones se encuentran en un intervalo de tiempo de 6 horas.



```
! Version: 1.0
! Source: J. Boehm, TU Vienna (created: 2016-09-15)
! Data_types: VMF1 (lat lon ah aw zhd zwd)
! Epoch: 2016 09 14 00 00 0.0
! Scale_factor: 1.e+00
! Range/resolution: -90 90 0 360 2 2.5
! Comment: http://gqosatm.hq.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/
90.0 0.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 2.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 5.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 7.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 10.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 12.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 15.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 17.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 20.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 22.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 25.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 27.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 30.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 32.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 35.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 37.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 40.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 42.5 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
90.0 45.0 0.00122542 0.00057716 2.2792 0.0680
```

Figura 8 - Muestra grilla VMF

En la Figura 8, es posible visualizar el formato estándar de una grilla, en ella se destaca la latitud, longitud (primera y segunda columna), el coeficiente "a" para la componente seca y húmeda (tercera y cuarta columna), como también, el retraso cenital para las mencionadas componentes (quinta y sexta columna respectivamente).

En lo que respecta su uso en Bernese, estas actúan en las últimas fases del procesamiento, para así lograr una mejor calidad de los resultados.

4.2.3.3 Centros de fase

La agencia *National Geodetic Survey* (NGS) ha realizado estudios sobre el *offset* de centro de fase de antena GPS (Mader, 1999). Dicho estudio, establece que el efecto se produce debido a una observación GPS, la cual se mide a partir de una señal de satélite y que es transmitida al centro de fase eléctrica de la antena receptora. La variación del centro de fase eléctrico *Phase center variation* (PCV), es una función del patrón de fase de una antena particular (Aloi, 1999). El centro de fase de una antena GPS no es ni un solo punto físico bien definido ni un punto estable, sino que varía con el cambio de dirección de acuerdo a la señal del satélite entrante. Sin embargo, en la práctica, los usuarios asumen que el punto de señal recibida se mantiene constante durante el período de observación, que se refiere a menudo como el centro de fase de la antena.

Ader (1999) experimentó en una serie de pruebas utilizando las líneas de base para estudiar la posición relativa del centro de la fase de la antena con respecto a la antena de referencia. Sin embargo, las calibraciones de antena absolutas no han sido claramente demostradas. Para líneas de base muy cortas usando antenas idénticas en los extremos opuestos, las variaciones de centro de fase deben anularse y no se observa ningún efecto. Por otra parte, cuando se utilizan diferentes tipos de antena y estas variaciones se tienen

en cuenta, la solución de referencia será la media ponderada de los centros de fase individuales de las dos antenas. El desplazamiento central de la fase de la antena puede reflejar una exactitud de posicionamiento vertical significativa de hasta 10 cm y sub-centímetro en la horizontal.

Normalmente, el PCV es una función de la elevación como del acimut (Wubbena et al., 1997 & Aloï, 1999). No es fácil modelar las variaciones del PCV, esto debido a la alta correlación temporal con las distintas señales reflejadas y la antena específica.

Bernese alberga un banco de datos en donde se especifican los distintos PCV, para distintas marcas en donde esta variación es corregida.

4.2.3.4 Mareas

Las mareas hacen referencia a un desequilibrio y perturbación respecto a la fuerza gravitacional terrestre. Lógicamente la Tierra al estar rodeada de cuerpos celestes, lo que implica que también esté rodeada de distintas fuerzas que interactúan entre sí. Estas fuerzas producen deformaciones, y es por ello que deben ser estudiadas.

Potencial de marea

Las mareas de la Tierra se producen de acuerdo con las variaciones de la fuerza de gravedad, las cuales son ejercidas por cuerpos celeste, como la Luna o el Sol.

Para comprender esto, hay que considerar que un punto sobre o dentro de la superficie terrestre, su fuerza gravitatoria es una suma de dos componentes, Figura 9.

La primera componente es la fuerza que gobierna el movimiento de la Tierra como un todo, esto equivale a la fuerza gravitacional que actúa en el centro de gravedad de la Tierra. La segunda componente es la fuerza de marea que es igual al resto de las fuerzas que actúan en la punto.

Viendo todo en su conjunto, las mareas deforman la superficie equipotencial provista por el campo gravitacional, de manera que se produce un alargamiento con dirección al cuerpo celeste.

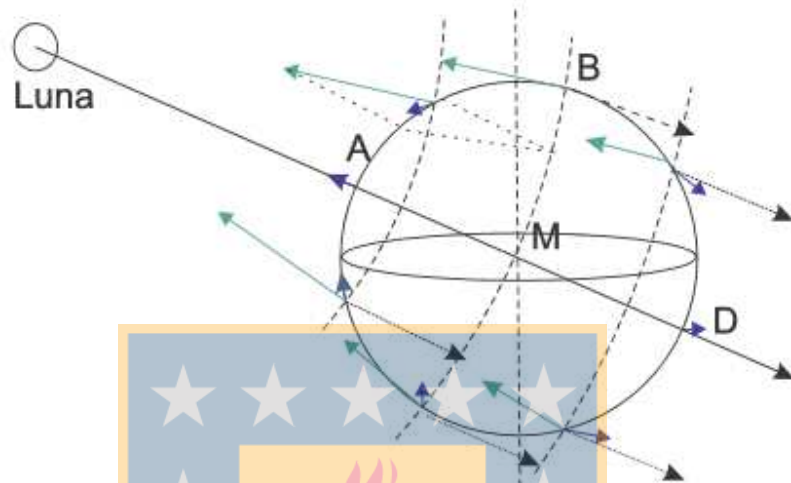


Figura 9 - Esquema de la fuerza de marea Lunar

De acuerdo a la leyes gravitacionales de Newton, es derivado el potencial de marea por la siguiente expresión(15)(Vanícek and Krakiwsky ,1982):

$$W_t^m(P) = \frac{Gm}{d_M^m} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r_p}{d_M^m} \right)^n P_n(\cos Z_p)$$

(15)

En donde:

m , Es la masa de la Luna, $7.38 \times 10^{22} \text{ kg}$

G , La constante universal de gravitación $6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{Kg s}^2)$

d_M^m Distancia entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna.

Z_p Ángulo cenital entre la Luna y P

P_n Funciones asociadas de Legendre

r_p Distancia del centro de masa de la Tierra a P.

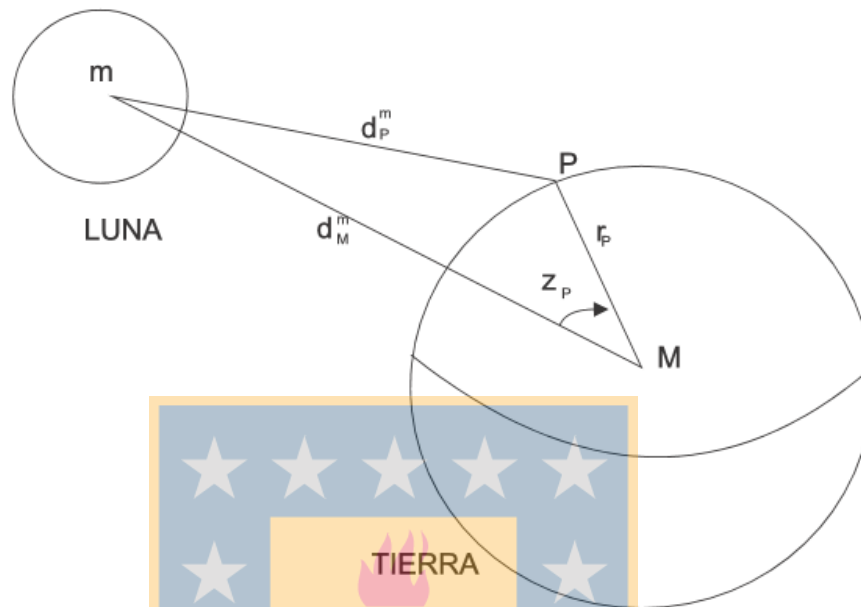


Figura 10 -Potencial de marea respecto a la Luna

De una manera similar es posible obtener el potencial de marea solar, reemplazando en la notación lo que se propuso como Luna por el Sol. También es necesario decir que otros cuerpos contribuyen de una manera menor las cuales son vista en la Tabla 3.

Tabla 3 - Contribución de varios cuerpos celeste al potencial de marea.

Cuerpos celestes	Potencial de marea
Luna	1.0
Sol	0.4618
Venus	0.000054
Jupiter	0.0000059
Marte	0.0000010

Fuente: Vaníček and Krakiwsky, 1982

Desplazamientos de mareas sólidas terrestres

Con el gradiente de la ecuación (15), se obtienen las componentes de las fuerzas de las mareas de acuerdo a un sistema geocéntrico. Para llegar a la obtención, se puede decir que es relativamente fácil, ya que su cálculo necesita principalmente del conocimiento del movimiento de la Tierra respecto al Sol y la Luna, esto de acuerdo a que otras mareas no son perceptibles. Posteriormente, es necesario la inclusión de los números *Shida*, que básicamente son factores de conversión para reflejar la Tierra como un cuerpo no rígido.

Luego, una posición de acuerdo a la superficie terrestre recibe correcciones conforme a las componentes geocéntricas de un marco de referencia en función del tiempo o época.

Por ejemplo:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta y(t) \\ \Delta z(t) \end{bmatrix}$$

(16)

Donde $x(t)$, $y(t)$ y $z(t)$, son las coordenadas de un punto observado en un tiempo t . Luego las correcciones son calculadas de acuerdo al desarrollo de efemérides planetarias y efemérides lunares.

De acuerdo a esto Bernese utiliza el archivo de efemérides planetarias DE403 y el de efemérides lunares "Lunar Ephemeris LE403". De los cuales, el archivo de efemérides planetarias DE403 especifica la posición de los cuerpos celeste del sistema solar, mientras que el archivo LE403, especifica la posición de la Luna.

Mareas oceánicas

La marea de carga del océano es la deformación del fondo del mar y la tierra adyacente en respuesta a la redistribución del agua de mar que tiene lugar durante la marea del

océano. Las mareas oceánicas pueden ser medidas a través del uso de mareógrafos, donde la medida altimétrica es la suma del océano, mareas y cargas de la Tierra (Zlotnicki, 1996).

Un desplazamiento de sitio, puede ser descrito por una componente c (radial, este, sur) la cuál actúa bajo un cierto periodo de tiempo t :

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos (w_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (17)$$

Donde:

A_{cj}, Φ_{cj} Son elementos específicos de sitio que reflejan la geografía costera, la elasticidad y la densidad de la estructura de la Tierra

f_j, u_j Son funciones del nodo Lunar

χ_j Longitud media del Sol, Luna y Perigeo

La Tabla 4 muestra un ejemplo de archivo de carga oceánica para la estación WES2, Westford, Massachusetts (OSO, 2000).

Tabla 4- Muestra de un archivo de carga oceánica

```

$$ COLUMN ORDER: M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 MF MM SSA
$$ "PTM" = COMBINED SOLUTION:
$$      From RRAY: M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1
$$      From SCHW: MF MM SSA
$$ ROW ORDER:
$$ AMPLITUDES (m)
$$      RADIAL
$$      TANGENTL EW
$$      TANGENTL NS
$$ PHASES (deg)
$$      RADIAL
$$      TANGENTL EW
$$      TANGENTL NS

WES2 WES2
$$ GOT99.2 R.Ray_CC_PP_PTME ID: Feb 3, 2000 16:12 PTM
$$ Computed by H.G.Scherneck on gere.oso.chalmers.se, 2000
$$ 404409020 P WES2, IGS, GPS RADI TANG lon/lat: 288.5062 42.6129
.00716 .00193 .00191 .00067 .00422 .00281 .00139 .00048 .00043 .00015 .00060
.00353 .00065 .00089 .00019 .00047 .00022 .00015 .00003 .00011 .00004 .00020
.00188 .00041 .00039 .00015 .00033 .00034 .00011 .00011 .00003 .00003 .00013
-171.3 -163.1 173.1 -162.9 -9.4 -3.2 -8.9 3.6 12.8 61.4 -86.2
-129.2 -127.3 -156.2 -134.0 -21.4 15.7 -19.6 66.7 -3.2 170.7 -95.2
-22.5 9.0 -37.1 4.3 173.3 -155.3 176.5 -171.4 -55.7 -93.0 26.9

```

Fuente: (Witchayangkoon, 2000)

La marea de carga oceánica es una gran perturbación , de manera que tanto la amplitud como la fase son fuertemente afectados por efectos estacionarios y de frecuencia, normalmente tiene una magnitud de centímetros, y el desplazamiento vertical es aproximadamente tres veces más grande que las componentes horizontales.

Los modelos convencionales IERS para calcular desplazamientos de carga oceánica (IERS Convenciones, 1996) no incluyen el movimiento del origen del sistema de coordenadas (movimientos del centro de masa), contienen sólo los desplazamientos debidos a la deformación con respecto al centro de gravedad de la Tierra sólida (Scherneck, 1998).

Mareas atmosféricas

Las mareas atmosféricas afectan fundamentalmente al océano y a las mareas de la Tierra de una manera indirecta.

El nivel del mar se ve afectado como resultado de las variaciones de la presión atmosférica. Las variaciones espaciales y temporales de las masas atmosféricas deforman la superficie de la Tierra. Muchos estudios demuestran que sus posibles desplazamientos verticales son hasta 25 mm, y que alrededor de un tercio de esta cantidad afectan al desplazamiento horizontal. Una forma simplificada en el cálculo de desplazamiento vertical (mm) es (IERS Convenciones, 1996):

$$\Delta r = -0.35p - 0.55\bar{p}$$

(18)

Donde p es la presión de anomalía local con respecto a la presión estándar (101.3 kPa) y \bar{p} es la anomalía de presión promedio dentro del radio de 2.000 kilómetros que rodea al sitio.

4.3 Ajuste por mínimos cuadrados

El modelo Gauss Markov (GMM) consiste principalmente en establecer un modelo matemático donde se relacionan las observaciones con las incógnitas. Basado en Ghilani (2006), se tiene el siguiente modelo:

$$\begin{array}{l}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = L_1 + v_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = L_2 + v_2 \\
 \vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = L_n + v_n
 \end{array}
 \tag{19}$$

En donde:

x : representan las observaciones

v : representan los residuos

L_0 : representa el vector de las estimaciones

L_b : representa el vector de las observadas

L : representa el vector de las observadas menos las estimadas ($L_0 - L_b$)

Aplicando el desarrollo en serie de Taylor hasta el primer orden, se puede linealizar el sistema anteriormente presentado, quedando:

$$AX = L + v
 \tag{20}$$

En donde:

A : es la matriz jacobiana (o matriz de las derivadas parciales) que contiene los coeficientes de las ecuaciones de observación linealizadas.

La ecuación (21), es desarrollada para representar las ecuaciones normales:

$$A^t A X + A^t L = 0 \tag{21}$$

El desarrollo anterior presenta una solución para observaciones de igual precisión, las cuales pueden ser distintas al ponderar las observaciones, lo que implica añadir la matriz de peso. Con esto, la linealización queda de la forma:

$$PAX = PL + PV \tag{22}$$

En donde (24) da paso a las ecuaciones normales:

$$A^t PAX + A^t PL = 0 \tag{23}$$

y su solución es:

$$X = -(A^t PA)^{-1} A^t PL = -N^{-1} A^t PL \tag{24}$$

siendo:

$P =$ Matriz de peso

Para analizar las precisiones, se analiza la matriz de varianza- covarianza de los vectores resultates. La matriz varianza – covarianza corresponde a una matriz cuadrada que dispone en su diagonal principal las varianzas de todas las variables. Mientras que en los elementos no diagonales poseen las covarianzas entre dos variables. Entre sus

propiedades se encuentra que es simétrica con respecto a su diagonal principal y es definida positiva.

Así entonces, se tiene:

Matriz Varianza- Covarianza de los parámetros ajustados

$$\sum_{x_a} = \sigma_0^2 N^{-1} \tag{25}$$

Matriz Varianza- Covarianza de las observaciones ajustadas

$$\sum_{L_a} = \sigma_0^2 AN^{-1}A^T \tag{26}$$

Matriz Varianza- Covarianza de los residuos

$$\sum_v = \sigma_0^2 (P^{-1} - AN^{-1}A^T) \tag{27}$$

En donde:

σ_0^2 : varianza a priori

N : A^tPA



5 Procesamiento de datos GNSS con Bernese

5.1 Reseña del software

Bernese es conocido a nivel mundial como un software de tipo científico, el cual fue desarrollado por la universidad de Bern. Para explicar el término científico, se puede aplicar una analogía con respecto a un software de tipo comercial, en donde para realizar un procesamiento de tipo GNSS, el usuario en la mayoría de las veces sólo puede importar los datos, y lo demás queda destinado a una rutina pre definida que el usuario no conoce, y que en el mejor de los casos, el usuario sólo podría llegar a conocerla, pero que no puede modificarla en ningún caso. Es esta la diferencia que tiene Bernese con respecto a los otros software de procesamientos de datos, lo que se materializa en la entrega de máxima fiabilidad en la calidad de los resultados. Sin embargo, un aspecto no menor a entender es que los mejores resultados se relacionan conforme a la metodología y costos empleados. Con esto se quiere decir, que la mejora de un determinado procedimiento puede no detectarse en proyectos bajo determinadas escalas de trabajo. Para ejemplificar de mejor manera lo último, se puede decir que la utilización de un software de la envergadura científica que se requiere en Bernese, podría no detectarse en redes de tipo locales, en donde si bien estaríamos garantizando la máxima fiabilidad de los datos, estos mismos podrían conseguirse con otro tipo de software. Pero que en un caso, en donde se pretende la vinculación a estaciones fiduciales que son consistentes a un Marco de Referencia Terrestre (MRT), el uso de un software científico saca una gran ventaja con respecto a uno comercial.

A continuación, se presenta una breve descripción del software Bernese:

- **Software de gran precisión;** porque permite llevar un mayor control en las variables de un procesamiento de tipo GNSS. Para explicar esto, se puede pensar en que si se hace la analogía con un software comercial, y se ejecuta una determinada rutina. Bernese ofrece las herramientas necesarias para ir separando cada una de sus subrutinas e ir controlando cada una de ellas. Bajo este marco, el usuario puede controlar los modelos de potencial involucrados, el modelo de marea involucrado, las estrategias de resolución de ambigüedades, las estrategias propias de un ajuste, entre otras.

- **Software que presenta flexibilidad y autonomía;** esto debido a que si se piensa en la ejecución de una rutina determinada por un software comercial, el usuario no podría de alguna manera cambiar la que ofrece el software. Con Bernese, el usuario tiene a su disposición un grupo de herramientas, las cuales serían los distintos scripts que proporciona, para que el usuario diseñe su propia estrategia de procesamiento. De esta manera, el usuario puede romper con lo pre establecido por una rutina y además el tiene una libertad acerca de cómo pretende llevar a cabo un procesamiento.

Obviamente, lo último dicho establece como requisito fundamental un conocimiento teórico para poder llevar a cabo un procesamiento de este tipo. Lo que de alguna manera lo hace excluyente para cualquier tipo de usuario.

La libertad al usuario para poder llevar a cabo un determinado procesamiento, se puede traducir en la ejecución no tan sólo un procesamiento de tipo GNSS orientada a resolver una campaña global, regional o local, sino que también esto enmarca a procesamientos orientados al modelado de la ionosfera, modelado de

la troposfera, procesamiento de *Satellite Laser Ranging* (SLR) , estudios del vapor de agua, desplazamiento de placas tectónicas.

Poderosa herramienta de automatización; hay una razón por la que los principales centros de procesamiento a nivel mundial ven a Bernese como el software preferido para llevar a cabo sus actividades. Esto último hace referencia a la automatización.

El servicio que ofrece Bernese lo hace una herramienta poderosísima en estos ámbitos. Para ejemplificar esto, se puede pensar en la actual densificación del ITRF en Las Américas, la red SIRGAS, esta red se compone de 450 estaciones continuas. Si una campaña para un día se consideran el total de las estaciones hacen referencia a una gran cantidad de datos, sin dejar de pensar que los datos requeridos involucran más que los de observación que propinan los archivos RINEX de cada estación, esto porque se deben considerar modelos de ionosfera, troposfera y otros modelos.

Sin embargo, se debe considerar que los principales centros de procesamiento hacen referencia a soluciones anuales, es decir que las 450 estaciones que involucran a una red SIRGAS, deben multiplicarse por los días que sean necesarios para llevar a cabo un procesamiento de este tipo. Esto indica que la cantidad de datos necesarios son muchos.

Es por ello que Bernese a través de la programación con el lenguaje Pearl es posible llevar a cabo una automatización que involucra soluciones anuales en horas (Soto, Bataille, & Contreras, 2006).

Como quizás se ha podido deducir, Bernese exige una alta competencia en la fundamentación teórica para poder llevar a cabo un procesamiento, basándose fuertemente en fundamentos Geodésicos.

Es por ello que los usuarios son más bien acotados, entre los cuales predominan:

- Centros de investigación
- Centros de procesamiento.

Es común ver como se llevó a cabo los distintos procesamientos para estas redes de primer orden, son característicos de manera que Bernese es el software preferido de aquellas tareas.

- Estudiantes y docentes.

Las prestancias científicas que Bernese ofrece, permite que estudiantes y/o docentes lo utilicen en marco de investigaciones que son llevadas a cabo.

- Agencias que necesitan máxima calidad de procesamiento.

En el área privada hay agencias que necesitan un control mayor, ya que estas sitúan su área de trabajo en el área de monitoreo de estructuras de obras viales.

5.2 Estructura del software

Bernese fue elaborado de manera estructural por parte de alumnos, docentes y colaboradores. Esto explica que su desarrollo involucra un desarrollo secuencial en donde fueron desarrollados scripts que relacionan una funcionalidad con respecto a una determinada tarea en un procesamiento. Este desarrollo fue de manera gradual, hasta que en un cierto momento, se determinó que se podían unir todos los scripts creados para dar paso a un software, para ello fue necesario juntar los distintos programas desarrollados.

La unión de estos programas, implicó la adopción de una serie de variables de ambiente, que en conjunto con una interface dan consigo a la interoperabilidad de los distintos scripts desarrollados.

La interface que ofrece Bernese para Windows es bastante simple, dando preocupación sólo a la funcionalidad del software. Es por ello que la preocupación de los desarrolladores no se enfoca en dar una agradable interface a la vista, sino que más bien a dar paso a una interface que garantice la accesibilidad a los distintos programas que ofrece Bernese.

Sin embargo, la interface de este tipo (Figura 11) quizás no es intuitivita para cualquier tipo de usuario, es como dicho anteriormente, una guía en donde el usuario puede tener a disposición las múltiples herramientas que ofrece Bernese.

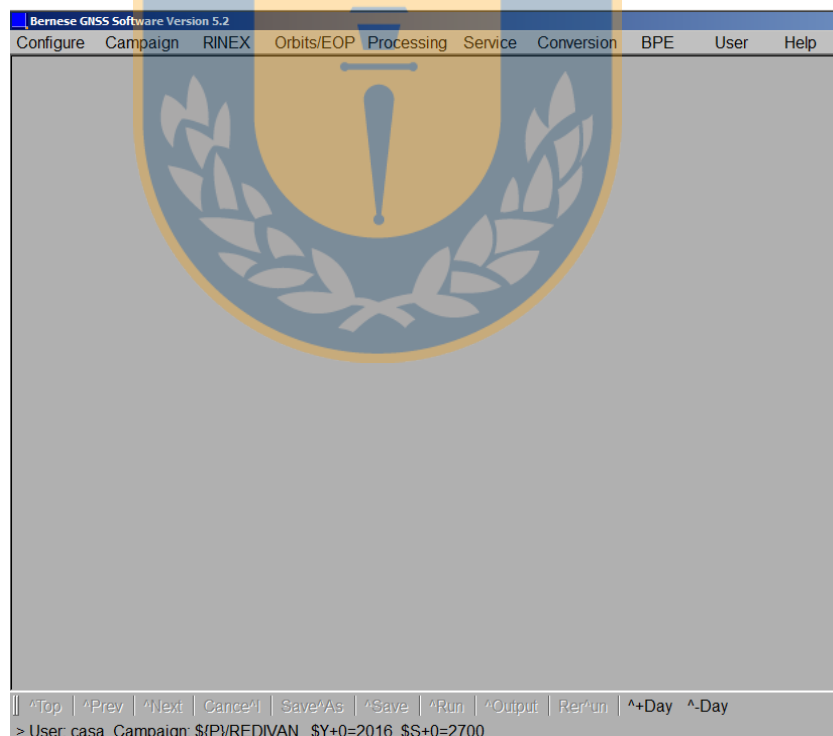


Figura 11 - Interface Bernese

Bernese se organiza en distintas áreas, que a su vez dan origen a subdirectorios jerarquizados, los cuales deben ser entendidos conforme a la utilización del software.

Así entonces, las áreas del software son:

- **Área programas:** Básicamente en esta componente se almacenan los distintos programas en Bernese, los cuales hacen referencia a los códigos o scripts, y que son necesarios para la automatización o simplemente para llevar a cabo un procesamiento de tipo GNSS.
- **Área usuario:** En este apartado se almacenan las configuraciones propias de un usuario en particular, y que se relacionan con configuraciones necesarias para un caso particular de procesamiento. Cada usuario elabora de una manera propia su estrategia de procesamiento.
- **Área de datos:** Aquí se alojan los distintos datos para llevar a cabo un procesamiento, en el caso de una campaña, en este apartado se insertan los archivos necesarios que involucran un procesamiento. Como es posible ver, en una campaña se manejan una serie de directorios, en que cada uno de ellos es específico para cada tipo de dato necesario, los cuales serán explicados con mayor claridad más adelante.

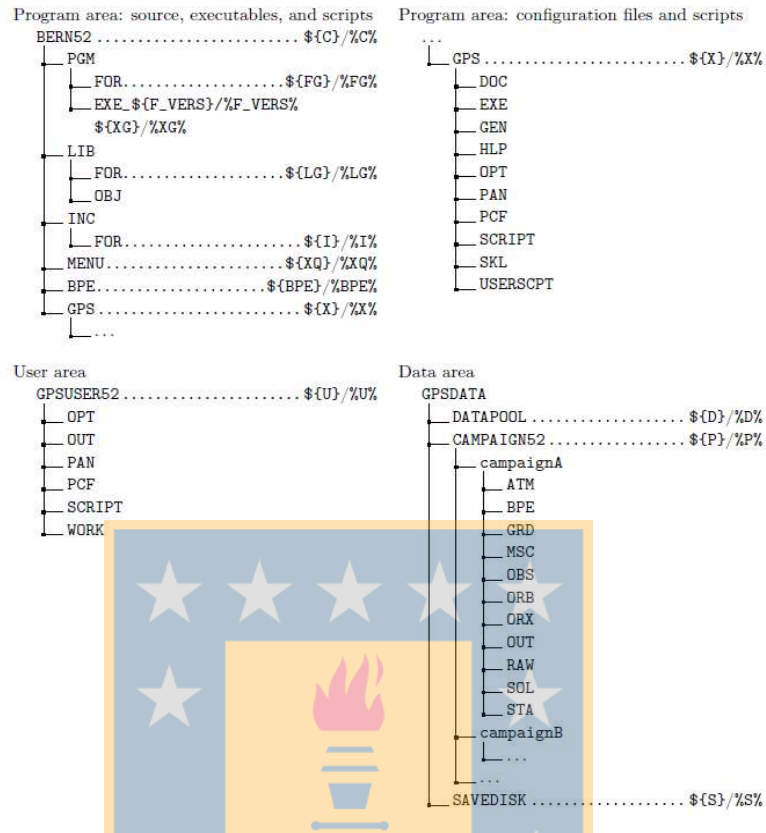


Figura 12 - Componentes Bernese

Fuente: Dach, 2007

Como es posible ver en la Figura 12, hay una serie de variables de ambiente para cada una de estas áreas, las cuales hacen referencia a las rutas de acceso de los distintos programas en cuestión.

La comprensión de la jerarquía operacional de Bernese es necesaria para el funcionamiento. Para comprender esto, se pondrá en práctica lo que se requiere resolver, es decir, una campaña GNSS vinculada a un sistema de referencia global. Para su realización, se necesita una campaña, la cual es una estructura propia de Bernese para anidar los datos involucrados, llevar a cabo el procesamiento y entregar los resultados finales.

Específicamente, la estructura de procesamiento para una campaña en Bernese es similar a la presentada en la Figura 13, en donde se alojan una serie de subdirectorios, los cuales serán descritos:

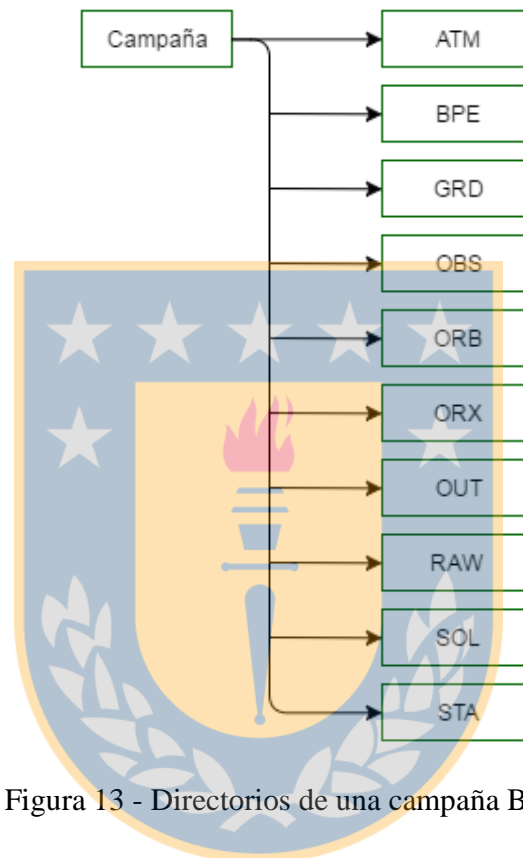


Figura 13 - Directorios de una campaña Bernese

ATM: Subdirectorio que almacena distintos datos que hacen referencia a modelos atmosféricos, es decir a modelos de ionosfera y troposfera.

BPE : Subdirectorio que almacena las salidas de la automatización de Bernese.

GRD: Se alojan los "*grid files*", este subdirectorio es utilizado para almacenar a la grilla propuesta por las *Vienna Mapping Function (VMF)*.

OBS: *Bernese-formatted observation files.* Acá se almacenan archivos que son necesarios en el manejo interno de Bernese, operando en un lenguaje propio.

ORX: *Original Rinex files,* en este subdirectorío son alojados los archivos RINEX originales, esto con el principio de que los datos nunca deben ser modificados, es por ello que al alojar los datos originales en este subdirectorío éstos no serán de ninguna manera intervenidos. Las copias son alojadas en el subdirectorío RAW.

OUT: Programas de salida y miscelánea de archivos. Acá son almacenados los archivos producidos por Bernese, esto en el marco de la ejecución de un programa determinado, en la que cada ejecución involucra por sí una salida o un reporte en los cuales son alojados en este subdirectorío.

RAW: Las copias de los archivos RINEX originales son alojados en este subdirectorío, estas en ocasiones son intervenidas ya que a veces se debe hacer uso del programa TEQC para tratar de manera tentativa las observaciones. Esto permite la realización de acciones como un cambio de nombre, una unión de archivos RINEX o cortes entre estos archivos.

SOL: *Solution- related files.* Un procesamiento en sí, necesita unas soluciones, las cuales pueden ser las ecuaciones normales de un procesamiento, estas se expresan en un formato *.NEQ.

STA: *Station-related files.* En este apartado o directorío se alojan los distintos archivos que son necesarios para las estaciones fiduciales. Acá se involucran los archivos *.STA que son extraídos de los RINEX, los archivos de velocidades *.VEL, o los archivos de abreviaciones *.ABB. En síntesis, lo que se pretende es juntar los archivos necesarios para que Bernese puede trabajar u operar de una manera eficiente conforme a la información proporcionada por las estaciones fiduciales.

La concepción de esta idea de jerarquía de subdirectorios alojadas en Bernese es necesaria para poder ejercer su funcionamiento de manera correcta.

En la práctica, lo que se hace es descargar una serie de datos a través de una serie de servidores que proporcionan los datos necesarios para llevar a cabo un procesamiento de este tipo.

Estos datos son llevados a cada una de las carpetas correspondientes, en donde se tratan de manera que el software pueda reconocerlos para así proporcionar las condiciones necesarias para un correcto funcionamiento.

5.3 Correcciones de la posición del satélite

"La necesidad de corregir la posición del satélite ,yace en que un error en la posición de un satélite es propagado en una línea base" (Bauerisima ,1983).

Con la expresión (29), es posible la propagación del error en la posición del satélite a una línea base:

$$\Delta x(m) \approx \frac{l}{d} \Delta X(m) \approx \frac{l (Km)}{25000 (Km)} \Delta X(m)$$

(28)

En donde:

Δx : Es el error en una línea base

l : longitud de la línea base

ΔX : Error en la posición del satélite

(29)

La Tabla 5 es una referencia propuesta por el *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE), de manera que con ello es posible de alguna manera vislumbrar los efectos en la longitud de línea base,

Tabla 5- Propagación de error de orbita en una línea base

Error orbita	Longitud línea base	Error línea base	Error línea base
2.5 m	1 km	0.1 ppm	- mm
2.5 m	10 km	0.1 ppm	1 mm
2.5 m	100 km	0.1 ppm	10mm
2.5 m	1000 km	0.1 ppm	100 mm
0.05 m	1 km	0.002 ppm	- mm
0.05 m	10 km	0.002 ppm	- mm
0.05 m	100 km	0.002 ppm	0.2 mm
0.05 m	1000 km	0.002 ppm	2 mm

Fuente: (Dach, 2007)

Así entonces, se realiza una corrección con respecto a la posición de los satélites. La mayoría de los softwares de procesamiento de datos no presentan esta corrección, con lo cual ya hay un cambio respecto a lo tradicional, de manera que ya se marca un precedente de la rigurosidad con la que se llevará a cabo el procedimiento.

Las orbitas de los satélites GNSS, junto a los parámetros de la orientación de la tierra y correcciones del reloj, son fundamentales para el análisis de datos GNSS.

Lo primero que debe entenderse de las orbitas, es que su posición es obtenida a través de las efemérides que proporciona el CODE, las cuales vienen en una archivo de extensión

SP3, en ella resulta la posición del satélite en un intervalo de 15 minutos y en un sistema de referencia terrestre.

Luego, la posición de un satélite puede ser mejorada si se piensa en la mecánica celeste de las orbitas. Siguiendo que una trayectoria de una órbita puede ser descrita por las orbita de Kepler. De las cuales, estas orbitas son perturbadas por fuerzas gravitacionales. En una reducción o de una manera más simplificada, si se considerara que una órbita está afectada en primera instancia por una fuerza de gravedad simétrica, la cual no existe pero que con fines de explicar la situación es un buen ejemplo.

La ecuación (30), muestra como se describe la trayectoria de un satélite:

$$\ddot{r} = -GM \frac{r}{r^3}$$

(30)

Esta reducción se conoce como el problema cerrado para dos cuerpos. En donde GM corresponden al producto de la constante gravitacional y la masa de la tierra y r corresponde a un radio vector al geocéntrico a la Tierra. La ecuación presentada, forma una ecuación de segundo grado. Luego, esta orbita puede ser descrita por una serie de parámetros, seis siendo más específico.

a Semi eje mayor de la orbita

e Primera excentricidad

i Inclinación de la órbita con respecto al plano ecuatorial

Ω Ascensión recta. Ángulo comprendido entre el equinoccio Vernal y la línea de intersección de la trayectoria del satélite, medido en el plano Ecuatorial

ω Argumento del perigeo, ángulo entre el nodo ascendente y el perigeo (medido en dirección del satélite)

u Argumento de latitud. Ángulo comprendido por el nodo ascendente hasta la posición del satélite en un tiempo t_0 .

La Figura 14, muestra como se componen espacialmente la parametrización definida anteriormente:

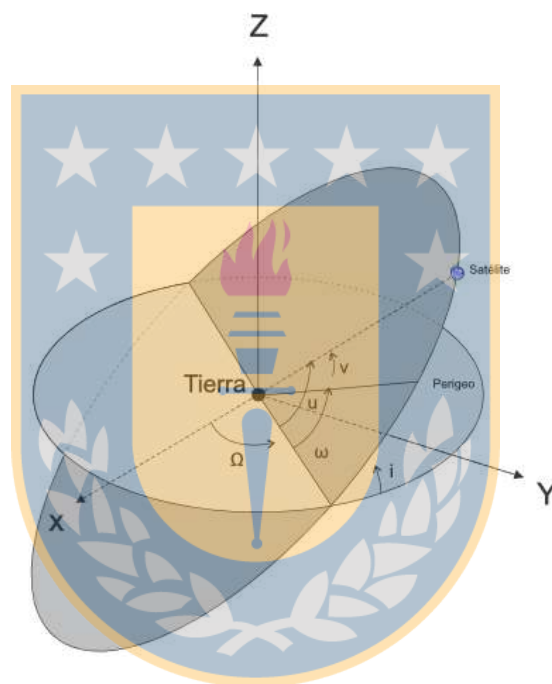


Figura 14 - Órbitas de Kepler

No obstante, las ecuaciones presentadas corresponden a una reducción. De una manera extendida se tendría la ecuación de movimiento (31):

$$\ddot{\mathbf{r}} = -GM \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{a}(t, r, \dot{r}, p_0, p_1, p_2, \dots) = \mathbf{f}(t, r, \dot{r}, p_0, p_1, p_2, \dots) \quad (31)$$

En esta situación, " a " es la caracterización de una serie de perturbaciones que modifican la órbita GNSS. Para ello Bernese cuenta con una serie de modelos para describir de una manera más fiable la órbita de un satélite. Al derivar las ecuaciones de movimiento con respecto a la posición y el tiempo, estas últimas reciben el nombre de ecuaciones variacionales. Las cuales son utilizadas para determinar la posición de un satélite.

La idea general es que con Bernese se añaden nuevos parámetros que reflejen las perturbaciones gravitacionales que alteran a la órbita de un satélite GNSS. Los parámetros añadidos obedecen a la formulación matemática de la mecánica celeste. Sin embargo, el procedimiento llevado a cabo presenta una complicación en los datos de entrada, esto debido a que las posiciones de los satélites son obtenidas por medio de efemérides, lo cual significa que la posición de estos están un sistema de referencia terrestre. Se necesita una transformación de sistemas para aplicar las correcciones.

Con los parámetros de orientación de la Tierra, se puede realizar la transformación de un sistema de referencia terrestre a otro celeste. De manera, después de la transformación se aplica la formulación matemática para la generación de posiciones más precisas de los satélites.

La idea es que el conjunto de las perturbaciones añadidas, se pueda representar de una forma polinomial las trayectorias de una órbita, y no a cada 15 minutos como lo entregan los datos de las efemérides.

En la práctica, Bernese ofrece una serie de scripts para llevar a cabo esta situación. Básicamente la resolución de esta situación es llevado en 2 pasos.

- **Transformación de sistemas de referencia:** Llevar de un sistema de referencia terrestre a uno celeste

- **Generación de orbitas estándar:** Se obtiene una representación polinomial de las orbitas de un satélite.

Bernese ofrece la posibilidad de conocer el RMS (error medio cuadrático) con respecto a la posición del satélite a un intervalo de tiempo determinado. En donde generalmente, esta posición es conocida en el orden de milímetros, y con ello la posibilidad de que un error se propague en una línea base sería prácticamente despreciable.

5.4 Sincronización de relojes

El *bias* (sesgo) existente del reloj del receptor, es un término característico en las ecuaciones de diferencias de fase.

Para que esta diferencia no afecte en cálculos posteriores, se necesita una precisión de un microsegundo. Por tanto, en esta etapa puede ser utilizada la cero diferencia de las observaciones de código, debido a que el rms permitido puede no ser más grande que 300 metros. Esto se explica con la multiplicación de un microsegundo por la velocidad de la luz, lo cual da un resultado de 300 metros. En este sentido, la cero diferencia de código tiene una precisión que basta para hacer la sincronización del reloj del receptor.

Las correcciones son guardadas en los archivos de observación tanto de código como de fase.

Aunque Bernese puede añadir estos parámetros desconocidos en un posterior ajuste por mínimos cuadrados, esto involucraría una nueva adición de parámetros desconocidos. Entonces como una manera de tratar independiente y evitar una deficiencia de rango en la matriz de diseño, Bernese ofrece la utilización del programa CODSP.

De esta manera se obtienen residuales conforme a la posición de cada estación. En esta primera aproximación los resultados pueden estar entre 1 y 3 metros de error. Lo cual habla de un buen indicador conforme a una posible degradación de la señal. Una observación afectada por la degradación intencional de la señal podría estar entre 20 y 100 metros (Dach R, 2007).

5.5 Líneas bases

Esta situación concierne a la formación de las simples diferencias de fase. Para ello Bernese ofrece una serie de estrategias para afrontar la situación. De esta manera, se crean una serie de nuevos archivos de observación, los cuales corresponden a las líneas bases.

Bernese ofrece distintas estrategias, en ellas:

- **Star:** Se selecciona una estación como base o referencia. Luego de ella se obtienen líneas bases para las demás estaciones.
- **Shortest:** Se crean líneas bases en función a la distancia más corta entre estaciones. Es utilizado cuando se utilizan líneas bases en el mismo intervalo de grabación.
- **Obs-max:** Las líneas bases se crean a partir de las máximas observaciones entre cada estación involucrada.

Las estrategias *OBS-MAX* y *SHORTEST* pueden ser de alguna manera combinadas. Su utilización se adecúa a la situación que se requiera resolver.

Además Bernese ofrece la opción de crear líneas bases pre definidas. En este caso, el usuario crea un archivo en donde las líneas bases quedan establecidas, de igual manera el

software asiste de manera que controla que ciertas condiciones sean cumplidas para la creación de las simples diferencias.

Es bueno mencionar que las simples diferencias quedan estipuladas como ficheros, que desde luego serán utilizados en otros programas posteriormente (Dach.R ,2007).

5.6 Detección de saltos de ciclos

Los saltos de ciclos son tratados de una manera independiente y conforman una serie de programas que están orientados a una fase previa de pre análisis, en donde se tratan las observaciones de una manera tentativa para llegar al ajuste de observaciones.

Los saltos de ciclos pueden ser producidos por :

- Obstrucción de la señal de las observaciones debido a árboles o construcciones.
- Alto ruido en las observaciones, producido por cambios ionosféricos.
- Fallas en el receptor.
- Mal funcionamiento del oscilador del satélite.

Para este problema, Bernese ofrece un tratamiento, el cual es llevado a cabo por el programa MAUPRP. Este programa dentro de Bernese permite:

- Marcar observaciones , las cuales no cumplen con requisitos mínimos para ser consideradas en un eventual ajuste de observaciones.
- Identificar los grandes "outliers" (valores atípicos).
- Calcular una solución diferencial de época en vista de una referencia para los saltos de ciclo.
- Revisar todas las observaciones en los distintos intervalos de tiempo, para posteriormente verificar que estas no estén corrompidas.

El programa para la detección de saltos de ciclo, consta de opciones para marcar observaciones, en donde básicamente lo que se hace es excluir aquellas que no atiendan a propiedades de tiempo y de elevación de las observaciones

Existen procedimientos en donde se analizan los periodos de tiempo de observación, estos corresponderán a una función de tiempo en pocos minutos, y de bajo orden polinomial. Esto con la intención de encontrar periodos en donde no hay saltos de ciclo.

Luego es calculado una solución de época diferencial, esto en base a un ajuste de mínimos cuadrados para cada línea base, en donde una estación queda como fija y la otra es estimada. Luego de esto, se obtienen las coordenadas de la próxima estación. El resultado de este ajuste a priori, es un indicador de cómo puede estar orientado un ajuste por mínimos cuadrados por dobles diferencias de fase.

Una solución de la época diferencial, permite conocer los residuos de las portadoras. Con ello es posible aplicar una serie de estrategias que Bernese ofrece para la detección de los saltos de ciclo.

Las estrategias ofrecidas por el software atienden a algoritmos con una y doble portadora, los cuales operan bajo residuales de ambas portadoras de una solución de una época diferencial, dichos algoritmos se diferencian en la utilización de los residuos ya sea simple o doble frecuencia. La utilización de estos algoritmos dependen de la longitud de las líneas bases estudiadas. No obstante, es posible realizar configuraciones que permitan atender a la resolución de saltos de ciclo para diversas longitudes de líneas bases (Dach, R, 2007).

Detección de saltos de ciclos :Algoritmo de doble banda

La utilización del algoritmo de doble banda es utilizado en líneas bases extensas, esto con la finalidad de realizar combinaciones lineales de las portadoras y disminuir el efecto ionosféricos. Conforme a esto, se utiliza la combinación L3.

Utilizando el residual r_3 de la frecuencia L3 y los residuos r_1 y r_2 (de portadoras L1 y L2) se tiene:

$$r_3 = \beta_1 r_1 + \beta_2 r_2, \quad \text{donde } \beta_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{ y } \beta_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (32)$$

Luego se realiza la siguiente prueba:

$$[r_3] \leq 3g \sqrt{(\beta_1 \sigma_1)^2 (\beta_1 \sigma_2)^2} \quad (33)$$

En donde $g = \sqrt{8}$, haciendo un factor relacionado a las triples diferencias.

Los valores σ_1 y σ_2 , son configurados de acuerdo al sigma a priori de L1 y L2.

Detección de saltos de ciclos : Algoritmo de una banda

El algoritmo de una banda es usado específicamente en líneas bases más cortas.

Ya sea L1 o L2, se evalúan los residuos r_1 y r_2 , en donde se calcula un valor b_1 o b_2 :

$$b_1 = NINT \left(\frac{r_1}{\lambda_1} \right) \text{ o } b_2 = NINT \left(\frac{r_2}{\lambda_2} \right) \quad (34)$$

NINT: entero más cercano

λ : Longitud de la onda

Luego se calcula un valor m_1 o m_2 :

$$m_1 = b_1 \lambda_1 - r_1$$

$$m^2 = b^2 \lambda^2 - r^2 \quad (35)$$

Posteriormente se hace una prueba respecto a un parámetro ionosférico :

$$m \leq M_{ion} \quad (36)$$

de manera que M_{ion} representa el máximo cambio ionosférico por época. En este sentido se puede establecer un límite de la fracción de onda (e.j 30% de la onda).

Ambos algoritmos hacen referencia a la solución de época diferencial (triple diferencia).

En el algoritmo de doble banda se realiza una prueba la cual contiene un factor de escala que proviene de la triple diferencia, y el segundo (una banda) es analizado respecto a la variación ionosférica, debido a que es un término que presenta una variación rápida en función del tiempo, el cual se ve representado en la triple diferencia.

5.7 Resolución de ambigüedades

Una ambigüedad es una fracción de la observación de fase que no se conoce con certeza. Existen muchos métodos para la resolución de ambigüedades. Algunos de ellos son sofisticados, otros son simples, pero la mayoría consisten en dos pasos:

1. Las ambigüedades son estimadas como números reales en conjunto a otros parámetros.
2. Los valores enteros de las ambigüedades son resueltos usando los resultados del paso 1, es decir, utilizando valores reales de las ambigüedades y la matriz varianza covarianza.

En el software Bernese, las ambigüedades pueden resolverse sólo si las dobles diferencias pueden ser procesadas.

Entre las posibilidades de la resolución de ambigüedades, se especifican los siguientes algoritmos (Dach, 2007) :

- *Round.*
- *Search.*
- *Sigma.*
- *QIF.*

Round

Es el algoritmo de resolución de ambigüedades más simple. En él se estima al número entero más cercano sólo redondeándolo, sin el uso de alguna información procedente de alguna matriz varianza-covarianza. Actualmente no es muy utilizada (Dach, 2007).

Search

La estrategia "*SEARCH*", es también llamada "*Fast ambiguity resolution approach*" (Frei & Boulter, 1990). Dicha estrategia es procedente de un ajuste por mínimos cuadrados que fue utilizado de manera inicial.

La principal desventaja de este método, es que sólo se tienen dos opciones, es decir, se resuelven todas las ambigüedades o ninguna. Lo cual, hace que sea un método no muy efectivo para el cálculo de ambigüedades.

Sigma

Considerando p_i, p_j dos parámetros de ambigüedades. Para cada p_i se calcula un *RMS* a posteriori de un ajuste inicial por mínimos cuadrados. Así, se tiene:

$$m_i = \sigma_0 \sqrt{Q_{ii}} \quad (37)$$

Donde Q_{ii} corresponde a un elemento de la matriz de cofactor. Luego, para la diferencia $p_i - p_j$ el error a posteriori es:

$$m_{ij} = \sigma_0 \sqrt{Q_{ii} - 2Q_{ij} + Q_{jj}} \quad (38)$$

Los RMS para un m_i , y un m_{ij} son calculados y ordenados. De esta manera, es llevada la ambigüedad al entero más cercano tomando el criterio.

- Un RMS compatible con la a priori
- Que este dentro de un intervalo de confianza.

El proceso es iterativo, y es terminado cuando:

1. Todas las ambigüedades son resueltas, o .
2. En el último paso no se pudo resolver ninguna ambigüedad adicional sobre la base de los criterios anteriores.

QIF

La estrategia " *Quasi Ionosphere-free*", está destinada a la resolución de ambigüedades en líneas bases extensas en donde el efecto ionosférico es considerable. En ella su implementación destaca la utilización de la combinación lineal L3 (39). En donde en una analogía de los casos anteriores, se estudian los enteros estimados, en conjunto a un error, del cual se verifica en conjunto a un parámetro ionosférico. Esta estrategia es eficiente para líneas bases entre 1000 y 2000 Km (Dach, 2007).

$$L3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L1 - f_2^2 L2)$$

(39)

En donde:

f_1, f_2 es la frecuencia de la portadora

$L1, L2$ es la observable de la fase

5.8 Ajuste y combinación de soluciones

Un ajuste por mínimos cuadrados es llevado a cabo por el programa GPSEST. La utilización de este programa puede ser realizada en varias ocasiones, ya que este programa permite:

- Estudiar de manera tentativa los primeros residuos
- Calcular una primera solución flotante
- Resolver ambigüedades
- Calcular una solución final
- Guardar los resultados en términos de ecuaciones normales

Las funcionalidades de GPSEST se adecuan al esquema implementado en el procesamiento de las observaciones.

Entre las distintas configuraciones que ofrece GPSEST, se tienen:

- Selección de observaciones:
Elección de; Sistema de satélite: combinación lineal utilizada; ángulo de elevación y tolerancia de simultaneidad.
- Modelado de observaciones y estimación de parámetros

Se especifica a al sigma a priori y el peso de las observaciones dependientes de la elevación.

- Selección de modelado de la troposfera
- Tratamiento de ambigüedades
- Definición de Datum

El incremento en número de estaciones GPS permanentes por todo el mundo, lleva asociado un gran número de observaciones, de las cuales tienden a ser procesadas de manera secuencial. Es por ello que Bernese ofrece el programa ADDNEQ2, que en su desarrollo se estipula el cálculo de soluciones de multi sesión. Esta técnica es conocida de Helmert (1872), en donde radica la operación con las ecuaciones normales de las respectivas sesiones.

Generalmente el cálculo de las soluciones finales, implica el uso de los programas GPSEST y ADDNEQ2. Específicamente, el uso de ADDNEQ2 permite combinar las ecuaciones normales y ahorrar tiempo de procesamiento que tardaría más en GPSEST, dando una clara ventaja en procesos automatizados que involucren grandes campañas.

La combinación de las soluciones de dos o más sesiones en una campaña GNSS, permite aumentar la calidad de los resultados, puesto en teoría este procedimiento pondría al descubierto la existencia de algún error de tipo grosero.

6 Implementación práctica de una red GNSS para la ciudad de Los Ángeles

6.1 Región de estudio

Para describir con claridad el área de estudio, es bueno explicar que existe una red local y una red global.

Aunque el caso de estudio se enfoca en el establecimiento de una red geodésica en el casco urbano de la ciudad de Los Ángeles, dicha red necesita ser enlazada a una red global para llegar a determinar coordenadas bajo un marco de referencia. Por ende, se consideran 4 estaciones fiduciales, las cuales pertenecen a una red SIRGAS.

La región comprendida de la red global abarca las latitudes 40°S y 30°S , en conjunto a las longitudes 66°O y 73°O . Luego la red local se ubica en los alrededores de la ciudad de los Ángeles, ubicada en la región y provincia del Bio Bio. Situada a 510 km aprox. de Santiago

6.1.1 Red global

La conformación de la red global, está dada por las estaciones fiduciales; SANT, ANTC, MGUE y UDEC (Figura 15). Dichas estaciones dan un área de estudio correspondiente a la zona centro sur de Chile. En donde, la limitante al norte sería Santiago y al sur sería Los Ángeles. Las otras dos estaciones, es decir, ANTC y MGUE, amplían el área de estudio al este, proporcionando una región delimitada en las cercanías de la cordillera de Los Andes. Datos adicionales sobre las estaciones fiduciales se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6 - Datos estaciones fiduciales

NOMBRE ESTACIÓN	RECEPTOR	ANTENA
MGUE 41558M001	SEPT POLARX4	LEIAR25.R4
ANTC 41713S001	TRIMBLE NETR9	ASH700936D_M
SANT 41705M003	ASHTECH UZ-12	AOAD/M_T
UDEC	TRIMBLE NETR9	TRM41249.00

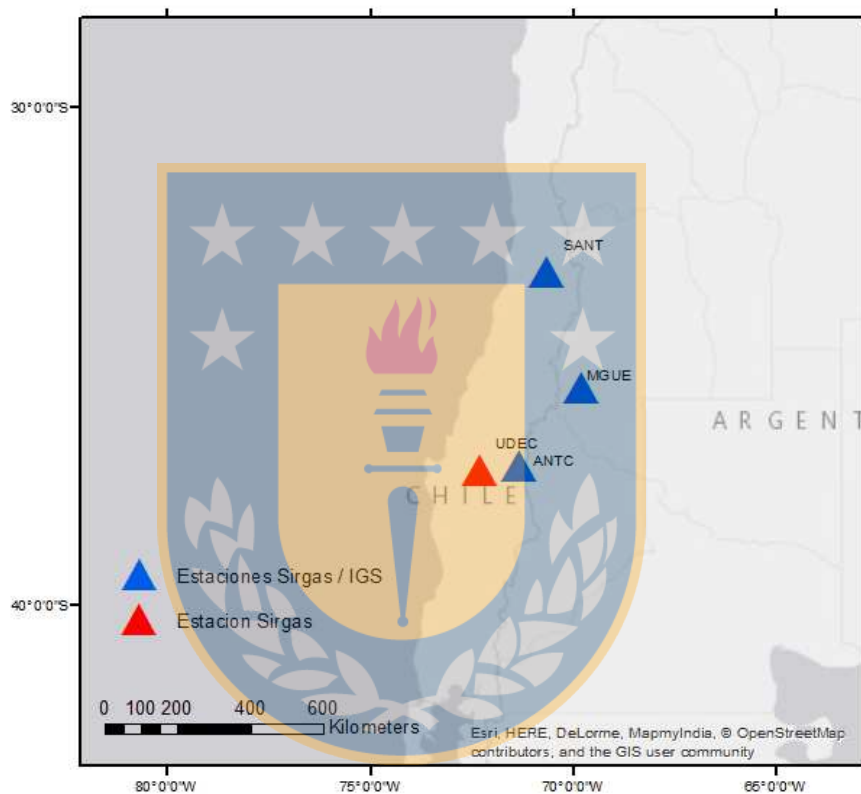


Figura 15 - Ubicación estaciones SIRGAS

La descripción de la red global, marca la delimitación a menor escala. Dicha red es pensada de manera tal que se pueda vincular la red a establecer (red local) a un marco de referencia global. No obstante el principal objetivo de este estudio, es la implementación de una red para la ciudad de Los Ángeles. En este sentido se utiliza como referencia la red monumentada por Flores (2015).

6.1.2 Red Local

La red local, envuelve el casco urbano de la ciudad de Los Ángeles. Esta red mencionada, consta de 6 estaciones.

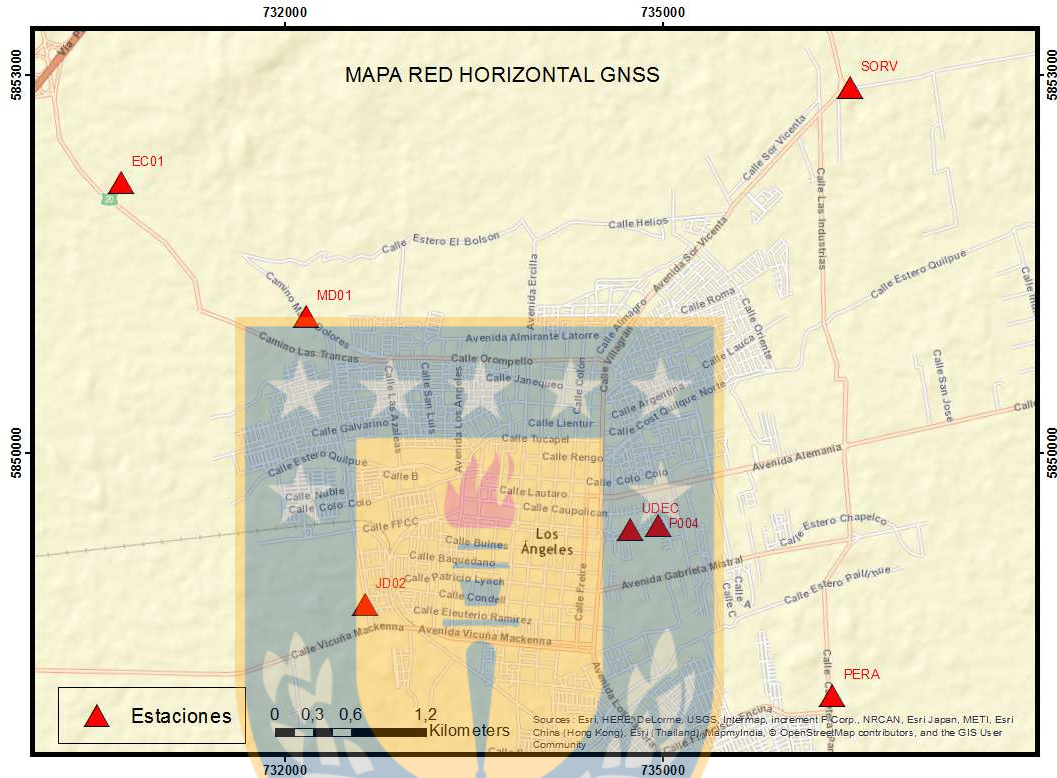


Figura 16 - Red Local

La ubicación de los puntos se describe a continuación:

- **EC01**, se encuentra en el noroeste de la ciudad, en un sector denominado El Cairo.
- **SORV**, se encuentra situado en el cruce de Avenida Sor Vicenta y Avenida Las Industrias, sector noreste de Los Ángeles.
- **PERA**, se encuentra en el sector sureste de Los Ángeles, en el denominado cruce el Peral.

- **P004**, se encuentra en el sector céntrico de la ciudad, en las cercanías de la Avenida Ricardo Vicuña .
- **JD02**, se encuentra en el suroeste de la ciudad de Los Ángeles, en la Avenida Padre Hurtado, a la altura de Villa Galilea.
- **MD01**, se encuentra en las cercanías de EC01, en el sector noroeste de la ciudad.

La ubicación de los puntos mencionados corresponden a una fase de análisis de Flores (2015), de donde se desprende la idea de buscar puntos que tengan una distribución lo más homogénea posible dentro de las reales posibilidades de materializar dichos puntos.

La planificación de dichos puntos corresponde a un trabajo en conjunto al asesor urbanista municipal Sr. Mauricio Carrasco, en donde se plantearon los lugares posibles de los puntos a monumentar.

NOTA: El punto MD01, fue removido. Por esta razón se monumentó nuevamente aquel punto. De esta forma, la componente propuesta para este punto por Flores (2015), no tendrá efecto para este vértice de la red.

6.2 Metodología seleccionada para el estudio

El desarrollo de este estudio consiste en dos etapas. Una de terreno en la cual se capturan los datos, y otra de post procesamiento. También es bueno mencionar como antecedente la utilización de datos pertenecientes a dos sesiones de trabajo.

La etapa de terreno consta de una campaña, la cual es llevada a cabo utilizando un modo de posicionamiento relativo, con la finalidad de corregir las observaciones. Luego se escoge el método estático para la toma de observaciones, esta elección se fundamenta tras

un análisis de las especificaciones del instrumental, en donde su empleo apunta a un menor error nominal.

La fase de post procesamiento es llevada a cabo con Bernese. Para su utilización se necesitan una serie de archivos, los cuales serán descritos posteriormente. El primer paso es revisar las coordenadas de estaciones fiduciales, las que se encuentran en el VEMOS 2015, para una época de definición 2013.0. La elección de este modelo es debido a que corresponde al último ajuste realizado de la red SIRGAS. Luego, se debe transportar las coordenadas de una época de definición a la época de observación.

Las correcciones llevadas a cabo, involucran una corrección de la posición del satélite, esto con la finalidad de mitigar la propagación del error en una línea base. Luego una etapa de sincronización del reloj del receptor, con la finalidad de calcular un término que está inserto en las ecuaciones de diferencias de fase, permitiendo detectar saltos de ciclo y reducir el número de incógnitas en el ajuste de mínimos cuadrados de las dobles diferencias de fase.

Posteriormente se crean las líneas bases utilizando los criterios, OBS-MAX, SHORTEST y STAR. Es decir, se emplean los tres métodos disponibles por Bernese. El criterio de OBS- MAX, permite crear las líneas bases que presentan un mayor número de observaciones, el método STAR, es creado con la finalidad de obtener líneas bases que asocien la red local, y SHORTEST para que cree líneas bases entre los puntos de la red local, lo que permite obtener una mayor redundancia.

La detección de saltos de ciclo, involucró dos algoritmos que fueron seleccionados en base a la distancia de las líneas bases. Así entonces, para las líneas bases mayores a 20 km se utiliza el algoritmo de doble banda, esto con la finalidad de crear una combinación

lineal que mitigue el efecto ionosférico. Luego para líneas bases menores de 20 km se emplean L1, debido a que en distancias más cortas esta frecuencia portadora presenta un mejor rendimiento (Dach, 2007).

Un ajuste por mínimos cuadrados de las dobles diferencias fue llevada a cabo, en él se establece un filtro de la utilización del sistema GPS, y se trabaja con una frecuencia L3. Esto debido a que Bernese no presenta una metodología estudiada para otros sistemas, y el uso L3 para disminuir el efecto ionosférico, esto considerando que el procesamiento incluyen todas las observaciones. El modelado troposférico se realiza con la utilización de las VMF, siguiendo recomendaciones del IGS, en donde se establece que es el mejor modelo para la componente seca y húmeda. Además, se define el datum geodésico mediante las coordenadas de las estaciones SIRGAS, las que son añadidas como condiciones en donde sus errores y posiciones son obtenidas del VEMOS 2015.

Posteriormente se crean informes residuales de un primer procesamiento de las dobles diferencias, con la finalidad de extraer datos que podrían ser considerados como valores atípicos. Seguidamente, se procesan nuevamente las dobles diferencias de fase, lo que da como resultado una solución flotante.

La resolución de ambigüedades es llevada a cabo empleando la estrategia SIGMA, basado en recomendaciones de Dach (2007), las cuales se basan en la duración de la sesión y la longitud de línea base. Así entonces, para las líneas bases de menor extensión se utiliza SIGMA y las frecuencias L1&L2, y para las líneas bases de mayor extensión se utiliza la misma estrategia utilizando la frecuencia L5.

Luego se combinan las ecuaciones normales (considerando dos sesiones) para obtener la solución final, lo que da una mayor confiabilidad de los resultados ya que este paso sirve

como medida de validación. Finalmente, se llevan las coordenadas pertenecientes a una época de observación a una época de definición utilizando las velocidades de VEMOS 2015 para la red local.

6.3 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realiza con la finalidad de tomar observaciones en las estaciones de la red que bordea la ciudad de Los Ángeles. Los datos provenientes de las estaciones de la red global, serán descargados a través de servicios disponibles en internet, en donde es posible acceder al dato de observación perteneciente a un día de observación.

6.3.1 Instrumental

Dentro de la metodología para la captura de datos, es bueno mencionar que se ha realizado una revisión acerca las precisiones a las cuales se deben alcanzar, en conjunto a la disponibilidad instrumental que se tiene. Esta revisión hace referencia a las especificaciones de Bossler (1984) y las precisiones nominales propias del instrumental disponible.

Bajo a estos requisitos previos, se utilizan receptores de doble frecuencia para la medición de las estaciones observadas. Entre los cuales, se tiene:

- 2 receptores Trimble, modelo R-4
- 2 receptores Trimble, modelo R-8

El error de los modelos R-4 y R-8 utilizando el método estático, alcanzan los 3 mm +0.1 ppm en la componente horizontal y 3.5 mm+0.4 ppm en la componente vertical, esto haciendo referencia a la precisión nominal. Es importante señalar que la metodología empleada es la que alcanza un menor error.

Así entonces, se emplean 4 receptores GPS para la realización de la campaña. Entre otros elementos auxiliares, también fue necesario el uso de trípodes, huinchas, bases nivelantes, etc.

6.3.2 Planificación de terreno

Luego de la definición del instrumental utilizado en conjunto a la metodología empleada se deben definir las configuraciones del muestreo y el esquema de las sesiones.

Sobre las configuraciones del muestreo, se realizan dos cambios respecto a la red de Flores (2015). Estos cambios hacen alusión a la tasa de adquisición y a la duración de la sesión. La tasa de adquisición es cambiada de 10 segundos a 30 segundos, debido a que en esta ocasión el procesamiento incluirá estaciones continuas, de las cuales 3 de ellas tienen una tasa de adquisición de 30 segundos, por ende una tasa de adquisición menor sólo implicará un sobre uso de la memoria del receptor. El tiempo de duración de la sesión es cambiado de una hora a dos horas, esto conforme a que el involucrar estaciones de mayor distancia entre sí, se necesita mayor tiempo para resolver correctamente las ambigüedades (Senus, 1985). Dicho esto, se recogen las recomendaciones de Senus (1985), en ellas se establece un tiempo mínimo de medición de una hora utilizando la frecuencia L1 y L2 para una línea base mayor a 50 km. Con la idea de utilizar formar líneas bases con Antuco se emplea un tiempo de observación de dos horas.

Otros factores a configurados fueron:

- Mascara de elevación: 15°
- PDOP: < 6
- Sistema: GPS

La definición de la sesión fue estudiada con la finalidad de mejorar las geometrías internas de las figuras generadas por las sesiones.

El 2015, la planificación de las sesiones fue la siguiente (Figura 17):

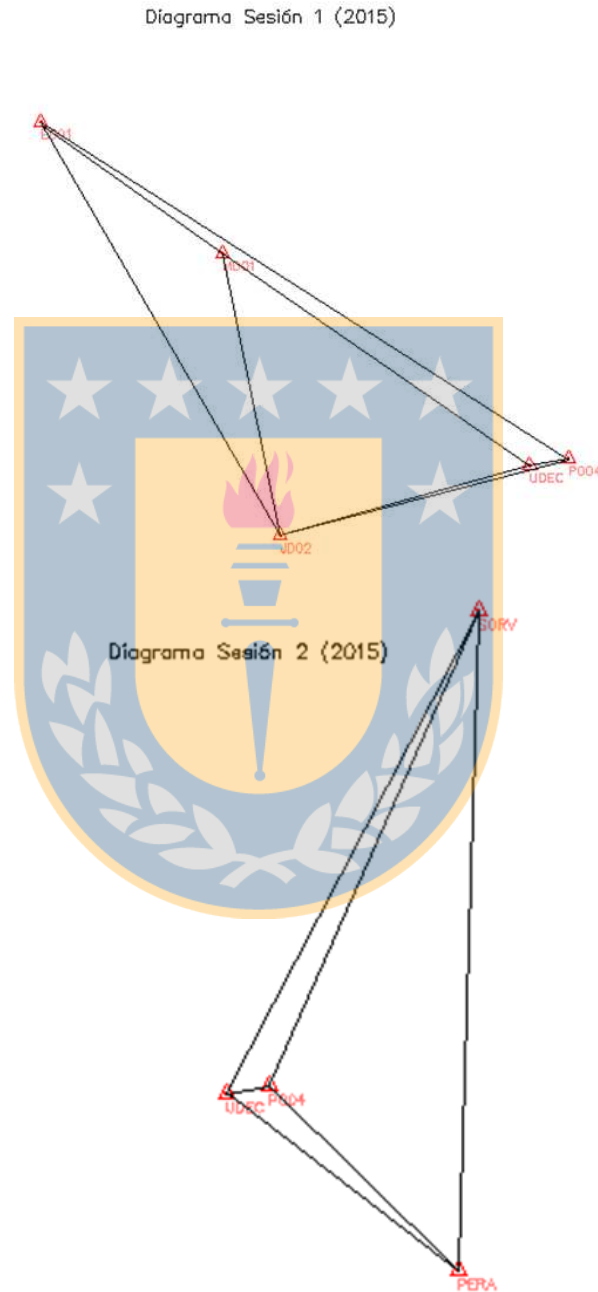


Figura 17 - Diagrama sesiones 2015

Esta planificación llevó a que los puntos con más observación fueran JD01, UDEC y P004, los cuales conformaban una figura con ángulos muy agudos. En este sentido, se tratará de conformar figuras más estables, de manera que exista la menor deformidad con respecto al diseño de la estructura.

Así entonces, se tienen las siguientes sesiones (Figura 18):

Diagrama Sesión 1 (2016)

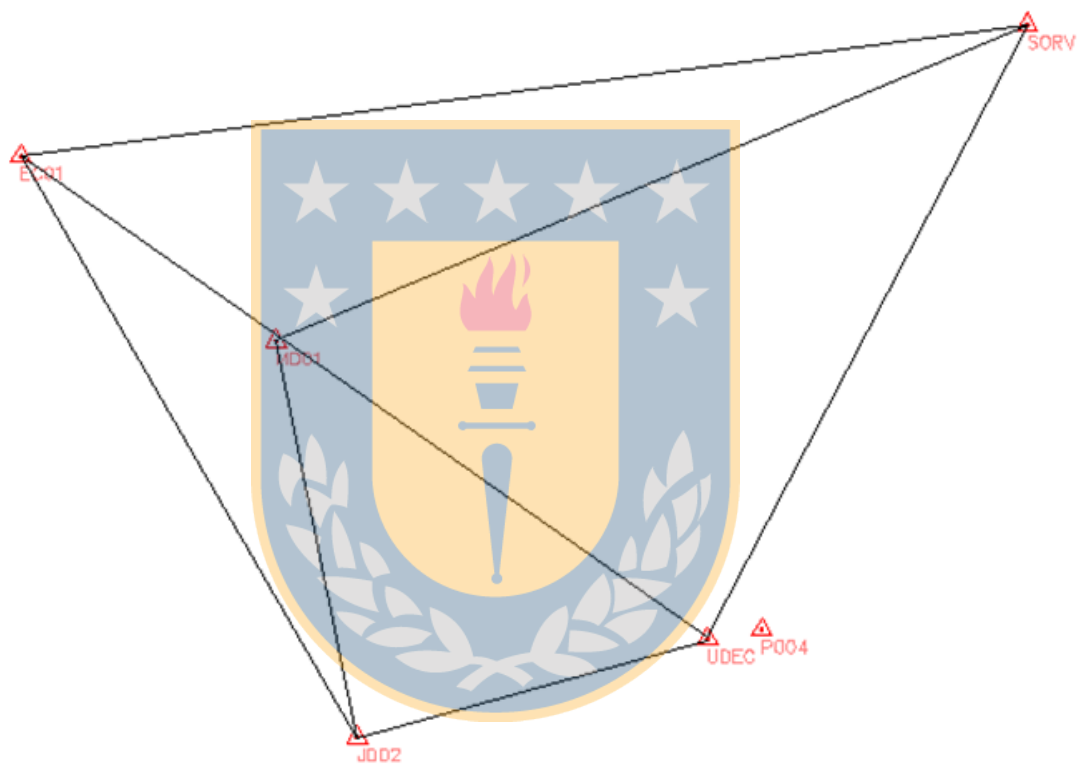


Diagrama Sesión 2 (2016)

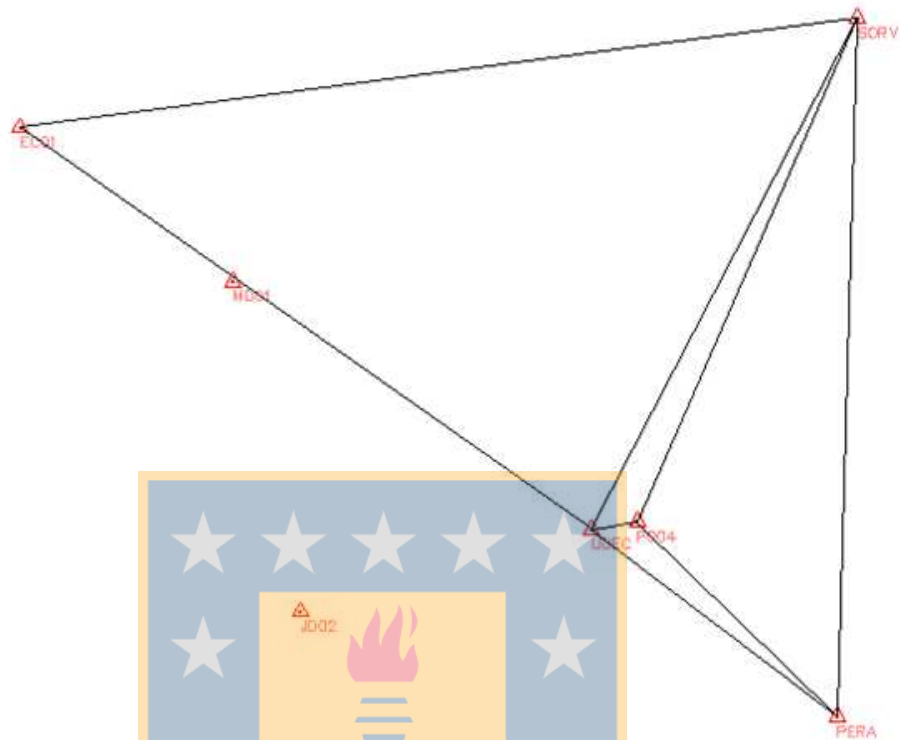


Figura 18- Diagrama sesiones 2016

En este sentido, se trata de mejorar el diseño de las sesiones en busca de mejores figuras más estables, en este caso la figura con mayor observación fue EC01, UDEC y SORV, de la cual geoméricamente presenta una similitud respecto un triangulo equilátero. No obstante, hay problemas en ciertos puntos, los cuales fueron diseñados anteriormente.

6.3.3 Comentarios

La ejecución de la captura de terreno fue diseñada sin menores inconvenientes. El día 13 de Septiembre (2016), fue realizada la primera sesión. Posteriormente el día 26 de Septiembre (2016), fue realizada la segunda sesión.

Es relevante la utilización de 4 receptores por sesión, a diferencia del 2015, que se utilizaron 3. Esto aumenta la redundancia de las observaciones.

6.4 Post procesamiento

6.4.1 Datos

Para la utilización de Bernese, es necesario el orden y utilización de un número determinado de datos. Los datos utilizados, dependen del número de sesiones en dicho procesamiento. Por otro lado, el conjunto de datos también depende de la estrategia del procesamiento llevada a cabo, la cual es descrita en 6.4.2. Ante estas dos condicionantes, se determinan los datos necesarios, los cuales serán los descritos en la Tabla 7

Tabla 7- Datos del procesamiento

Directorio	Archivos
ATM	Modelo ionosférico. Representado por una extensión *.ION
GRD	Modelos troposféricos, en donde hay uso de VMF como función de mapeo.
ORB	Parámetros de orientación de la tierra, como de extensión *.ERP y efemérides de extensión * EPH
RAW	Archivos de observación Rinex

STA

- .BLQ coeficientes para el modelado de la carga oceánica (FES2004)
 - .STA que contiene la información de las estaciones
 - .CRD que contiene las coordenadas aproximadas de las estaciones
 - .VEL que contiene las velocidades de las estaciones,
 - .ABB que contiene las abreviaciones para cada estación
 - .ATL con los coeficientes para el modelado de la carga atmosférica .
-

Los modelos atmosféricos de la ionósfera, son procesados por el CODE. Estos sirven para complementar la estrategia de resolución de ambigüedades QIF, y para modelar efectos del contenido total de electrones (TEC).

Los modelos troposféricos, hacen referencia a las *Vienna Mapping Functions*, debido a que según recomendaciones del IGS, son las que mejor modelan la componente húmeda como seca, a través del el ángulo de elevación de la señal.

Los parámetros de orientación de la Tierra y las efemérides son descargados del IGS, los cuales son un producto de una rigurosa solución multi-análisis GNSS.

Los RINEX hacen referencia al conjunto de la red local y global. Con respecto a las 4 estaciones fiduciales, las observaciones fueron descargadas directamente desde los servidores de la UNAVCO (<ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/>), en donde lo que se

hace es descargar las observaciones en un intervalo de 30 segundos. Estas observaciones comprenden periodo de ocupación de un día completo.

Es bueno mencionar, que los RINEX de las estaciones fiduciales estaban disponibles pero con una compresión Hatanaka . Para salvar dicha compresión las observaciones fueron tratadas con el programa CRX2RNX.exe.

El modelo de carga de oceánica debe corregir el movimiento periódico de las estaciones generado por las mareas oceánicas en tierra firme (respuesta elástica de la corteza terrestre a las mareas oceánicas). Dichas correcciones deben estimarse con el modelo FES2004, siguiendo recomendaciones de SIRGAS.

Finalmente los archivos de velocidades y coordenadas son obtenidas del VEMOS2015, el cual es el último procesamiento de la red SIRGAS para la época 2013.0.

Es importante mencionar que dichos datos, representan un tiempo de ocupación de un día, entonces en sentido, todas las observaciones que se realicen en un día necesitan este conjunto de datos.

Como las observaciones se caracterizan por un campaña que describe una utilización de dos días, uno por cada sesión. Se necesitan dos conjuntos de datos para llevar a cabo el procesamiento, en donde los datos prácticamente serían los mismos, solo discreparían en la el día de observación

6.4.2 Estrategia de procesamiento

Antes de empezar un procesamiento, y sobre todo al utilizar un software científico como Bernese, se debe planificar de forma rigurosa la forma en que se van a procesar los resultados. La importancia de esta etapa recae en que Bernese ofrece una infinidad de

posibilidades a la hora de procesar, sumados a un montón de parámetros y configuraciones. Por ende, es expresamente necesario tener claramente definido el procesamiento a seguir.

La libertad que ofrece Bernese en cuanto al procesamiento de datos GNSS, permite al usuario una serie de ventajas con respecto a lo tradicional. Sin embargo, también esto generaría dificultades.

Las ventajas se centran particularmente en el control de los procesos asociados, esto permite un mayor control con respecto al procesamiento, como se mostrará el usuario va controlando de manera secuencial y puede ir ajustando la mejor solución aplicando las metodologías y modelos que mejor puedan atender a la resolución del problema o situación a resolver.

El problema es que para llevar a cabo un procesamiento de este tipo, se requiere una gran cantidad de conocimientos relacionados a la Geodesia, el procedimiento para procesar las observaciones y tecnicismo propios acerca de la funcionalidad del software, en este caso de Bernese.

En un procesamiento de tipo comercial es común la utilización de rutinas predefinidas, ahora con la utilización de Bernese, el usuario tiene un mayor grado de involucración en el procesamiento. En donde para poder realizarlo, se debe crear un esquema para resolver el procesamiento.

Dicho esquema hace alusión a los programas y la secuencialidad que serán tratadas las observaciones. Aunque esto pudiese cambiar, conforme a mejores soluciones o productos, es importante notar que un esquema de trabajo permite al usuario guiar al usuario en busca de una gran calidad de los resultados

Con respecto al trabajo vinculado al procesamiento realizado, se determina el siguiente esquema de trabajo (Figura 19).



Figura 19- Estrategia procesamiento Bernese

Preparación de datos

1. Preparación de coordenadas

Las coordenadas de las estaciones fiduciales son obtenidas del modelo VEMOS 2015, el cual hace referencia a las coordenadas, velocidades y errores para cada estación conforme a la época 2013,0. De esta manera, la época de referencia es llevada a la época de

observación. Como las coordenadas pertenecientes a la red local, no están referidas a ningún marco, se utilizan las coordenadas aproximadas de los RINEX.

De esta manera, se tienen todas las coordenadas para la época de definición.

Esto se lleva a cabo con el programa COOVEL.

- **COOVEL:** Actualización de las coordenadas de las estaciones a la época de medición, da como resultado un archivo de extensión *.CRD.

2. Importación de archivos Rinex

Un Rinex contiene información como el tipo de receptor y antena. Por otro lado Bernese contiene una serie de correcciones para los datos mencionados. La utilización RXOBV3 (programa) toma una labor condicionante respecto a la interoperabilidad de los archivos RINEX, en relación a las correcciones que se almacenan internamente en Bernese. Una vez cumplida la condición, los archivos son importados

- **RXOBV3:** Conversión de los archivos de observación al formato Bernese. Se obtienen como resultados archivos de las mediciones de código de extensión *.CZH y *.CZO y mediciones de fase de extensión *.PZH y *.PZO. Las H y las O indican las cabeceras y observaciones respectivamente..

Preparación de orbitas

Para la corrección de la posición del satélite se utilizan los programas; POLUPD, PRETAB y ORBGEN.

- **POLUPD:** Conversión del archivo de parámetros de orientación terrestre de extensión "ERP", a un formato interno de Bernese.

- **PRETAB:** Transformación de las orbitas finales del IGS al sistema quasi inercial ICRF. Se tiene como resultado orbitas tabulares de extensión *.TAB y un archivo de correcciones del estado del reloj de extensión *.CLK

En este programa, además se establecen correcciones del centro de masa (cargas atmosféricas y cargas oceánicas), las cuales van orientadas a corregir las posiciones de los satélites que son provistos por las efemérides (archivo forma de extensión SP3).

- **ORBGEN:** Procesamiento de las orbitas provistas en un sistema quasi inercial ICRF. Del cual, da como resultado un archivo de órbitas estándares, las cuales son representadas por un polinomio, en donde se puede conocer su posición en cualquier instante de tiempo. Para ello Bernese utiliza los respectivos modelos de potencial gravitatorio como de mareas y la adición parámetros dinámicos, los cuales hacen que se pueda representar de mejor manera la trayectoria de un satélite en un ICRF. Todo lo anterior se basa en las ecuaciones de movimiento y variacionales, las cuales tienen por objetivo corregir la posición del satélite para reducir el error que se propaga en una línea base.

Pre procesamiento

En esta etapa se destacan la sincronización de relojes y la creación de las líneas bases, en ellos se utilizan los programas; CODSP y SNGDIF.

- **CODSP:** Sincronización de los relojes de los receptores. Se obtiene como resultado las observaciones de código *.CZH Y *.CZO, así como de fase *.PZH y *.PZO, ambas corregidas por el estado del reloj.
- **SNGDIF:** Creación de líneas bases o vectores con las simples diferencias dando como resultado simples diferencias de fase *.PSH y *.PSO.

En esta fase, se utilizaron tres estrategias para la creación de las simples diferencias, en ellas OBS-MAX, SHORTEST y STAR, está última conforme a dar una solución a la red local.

Pre análisis

La etapa de pre análisis consiste en una etapa de filtración de los datos. Para ello se hace un tratamiento para encontrar saltos de ciclos, seguido de un procesamiento a priori de dobles diferencias, con la finalidad de extraer una cantidad determinada de datos que son considerados como *outliers*. El resultado del pre análisis termina con la solución flotante.

- **MAUPRP:** Se realiza la detección de mediciones defectuosas y saltos de ciclos. De este programa, salen los primeros resultados, de acuerdo al procesamiento de líneas bases (triples diferencias), en conjunto a un análisis de saltos de ciclos en las observaciones.
- **GPSEST:** Ajuste por mínimos cuadrados de las observaciones correspondientes a las dobles diferencias. La utilización en primera instancia de GPSEST, guarda relación con filtrar *outlier* s conforme a un análisis residual.

En este procesamiento se obtiene un archivo residual de extensión *.RES, con el que se tratarán dichos residuos.

- **RESRMS:** Evaluación estadística de cada uno de los residuales calculados por el GPSEST. Da como resultado un archivo con la indicación de las observaciones defectuosas *.EDT.
- **SATMARK:** Marcación y eliminación de los residuales de las observaciones defectuosas de los archivos de observación. Se obtienen los archivos *.PSH y *.PSO libres de errores groseros, s atos de ciclos y ambigüedades detectadas.

Luego de la utilización de este programa, es utilizado nuevamente GPSEST para obtener un nuevo ajuste. El resultado de dicho ajuste, es la solución flotante.

Resolución de ambigüedades

Para resolución de ambigüedades se utiliza el programa GPSEST.

- **GPSEST:** La resolución de ambigüedades, se basan en lo especificado anteriormente en la revisión bibliográfica. La estrategia empleada es la conocida como SIGMA, en ella se utiliza la frecuencia L1&L2 para la resolución de ambigüedades de la red local, y L5 para la resolución de ambigüedades de las estaciones fiduciales (red global). En ella, además se añaden parámetros troposféricos para las perturbaciones que se pudiesen generar en líneas bases referidas a las distintas estaciones fiduciales.

Solución final diaria

Luego de la resolución de ambigüedades, se realiza un ajuste de dobles diferencias de fase para cada sesión, en donde se guardan los resultados en un archivo de ecuaciones normales, para finalmente combinar las soluciones.

- **GPSEST:** Se reutiliza el programa, con la finalidad de guardar los resultados en un archivo de extensión *.NEQ. Esto consiste en guardar las soluciones para cada sesión en un archivo de ecuaciones normales.
- **ADDNEQ2:** Este programa es utilizado para combinar las soluciones normales procedentes de ambas sesiones de trabajo. Con ello se tiene como resultado las coordenadas que representan una solución final.

Por último, ya con las coordenadas definidas para época de observación, se vuelve a la época de definición para que sus coordenadas estén dentro del marco de referencia SIRGAS. Con esto las coordenadas calculadas están en una época 2013.0. Lo último es utilizado con el programa COOVEL.

El esquema de trabajo presenta la utilización de diversos programas, así como también la reutilización de estos mismo, como por ejemplo el programa GPSEST, en donde es utilizado para realizar un ajuste por mínimos cuadrados, como también para resolver las ambigüedades, esto se debe a las funcionalidades que ellos poseen.

Es importante señalar que en la práctica, se aplica la iteración entre los distintos procesos para encontrar la mejor solución posible.

La iteración fue utilizada para buscar las coordenadas aproximadas, las cuales eran necesarias para realizar el ajuste. De cierta manera, un ajuste en Bernese está condicionado por las coordenadas aproximadas. El problema radica principalmente en que las coordenadas de la red local no están referidas a ningún marco de referencia, en donde las coordenadas aproximadas son extraídas de los RINEX, lo cual implica una mera aproximación. Así entonces, se aplica un proceso iterativo para encontrar con mayor exactitud las coordenadas aproximadas de la red local

7 Resultados y Análisis

7.1 Procesamiento triples diferencias de fase

Los siguientes resultados corresponde al procesamiento de las triples diferencias de fase a través de un ajuste por mínimos cuadrados, en donde se procesó cada línea base por separado. La finalidad del procesamiento de las triples diferencias de fase, radica en que al haber una cancelación de las ambigüedades es posible encontrar errores groseros.

Sesión 1

Tabla 8 - Triples diferencias sesión 1

Línea Base	Longitud(Km)	Observaciones	Rms (mm)
ANTC MGUE	258	34.043	7
ANTC SORV	71	3.824	8
ANTC UDEC	73	34.421	6
EC01 MD01	2	2.844	7
EC01 UDEC	5	2.932	6
JD01 MD01	2	2.655	7
JD01 UDEC	2	2.741	6
MD01 UDEC	3	3.620	7
MGUE SANT	314	18.445	10
MGUE UDEC	324	34.313	7
SORV UDEC	4	3.838	6
UDEC ANTC	73	34.421	6
UDEC EC01	5	2.932	6
UDEC JD01	2	2.741	6
UDEC MD01	3	3.620	7
UDEC MGUE	324	34.313	7
UDEC SANT	503	17.657	12
UDEC SORV	4	3.838	6

Sesión 2

Tabla 9 - Triples diferencias sesión 2

Línea base	Longitud (Km)	Observaciones	Rms (mm)
ANTC MGUE	258	29.436	13
ANTC SORV	71	3.015	9
ANTC UDEC	73	29.783	9
EC01 UDEC	5	3.315	7
MGUE SANT	314	17.779	15
MGUE UDEC	324	33.878	21
P004 PERA	2	3.747	11
P004 SORV	4	2.817	11
P004 UDEC	1	4.103	10
PERA UDEC	2	4.358	8
SORV UDEC	4	3.027	7
UDEC ANTC	73	29.783	9
UDEC EC01	5	3.315	7
UDEC MGUE	324	33.878	21
UDEC P004	1	4.105	10
UDEC PERA	2	4.358	8
UDEC SANT	503	16.977	17
UDEC SORV	4	3.027	7

Conforme a los primeros resultados del procesamiento de las triples diferencias de fase (tabla 8 y tabla 9), se muestran a continuación las siguientes figuras (Figura 20 y Figura 21), que señalan la distribución del error de acuerdo a la distancia.

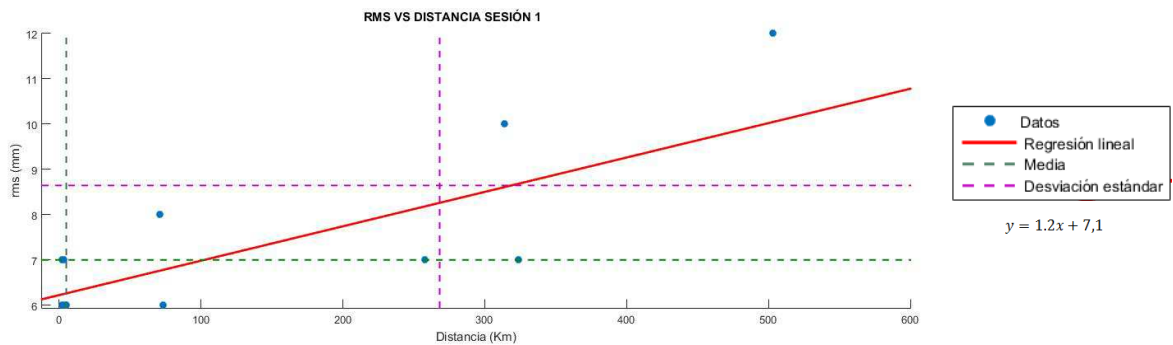


Figura 20 - rms vs distancia (sesión 1)

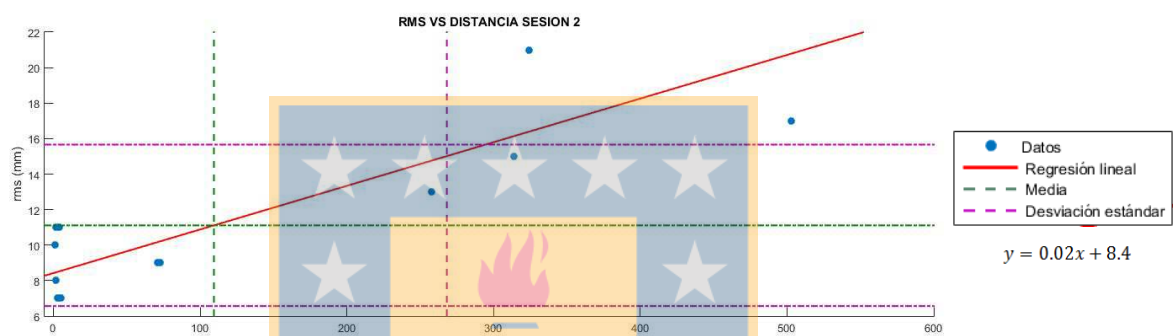


Figura 21- rms vs distancia (sesión 2)

Ambas gráficas muestran una tendencia positiva - creciente , en la que se destaca una proporción directa entre la distancia y el rms. Lo último quiere decir, que a mientras más distancia es procesada la línea base, mayor es el indicador rms. Por otro lado, es posible observar que hay diferencias entre los rms de la sesión 1 y de la sesión 2. Pero que en la sesión 2, es donde se muestran los resultados más deficientes. En este sentido, y considerando el uso del mismo instrumental, se puede decir que las variaciones serían producto de las condiciones atmosféricas y/o climáticas, de acuerdo a que ambas sesiones fueron realizadas en días diferentes.

Para la sesión 1, se tiene un promedio de 7 mm en rms. Por otro lado, en la sesión 2 se tiene un promedio de 11 mm de rms. Además, se observa que la sesión 2 es fuertemente afectada por las observaciones de las estaciones continuas, siendo en este caso los rms

más altos en el procesamiento. Los resultados obtenidos se analizan de acuerdo a las recomendaciones de Dach (2007), en donde se estima que estos resultados pueden tener un rms cercano a 20 mm, debido a que en esta fase se trata de conservar la mayor cantidad de observaciones, y que de afectar el procesamiento posteriormente, las observaciones serán removidas en un ajuste posterior y/o en el procesamiento de los saltos de ciclo.

7.2 Saltos de ciclo

Sesión 1

Tabla 10- Saltos de ciclo sesión 1

Línea Base	Saltos reparados	Saltos eliminados	Ambigüedades
ANTC MGUE	3	452	37
ANTC SORV	1	26	6
ANTC UDEC	1	458	38
EC01 MD01	1	30	18
EC01 UDEC	0	11	0
JD01 MD01	2	38	32
JD01 UDEC	0	23	14
MD01 UDEC	1	41	19
MGUE SANT	0	179	16
MGUE UDEC	2	457	38
SORV UDEC	1	16	2
UDEC ANTC	1	458	38
UDEC EC01	0	11	0
UDEC JD01	0	23	14
UDEC MD01	1	41	19
UDEC MGUE	2	457	38
UDEC SANT	0	158	16
UDEC SORV	1	16	2

Sesión 2

Tabla 11 - Saltos de ciclo sesión 2

Línea base	Saltos reparados	Saltos eliminados	Ambigüedades
ANTC MGUE	8	492	37
ANTC SORV	0	27	4
ANTC UDEC	4	557	31
EC01 UDEC	0	11	1
MGUE SANT	2	490	35
MGUE UDEC	10	653	46
P004 PERA	21	148	24
P004 SORV	11	93	20
P004 UDEC	24	179	28
PERA UDEC	0	12	1
SORV UDEC	0	14	2
UDEC ANTC	4	557	31
UDEC EC01	0	11	1
UDEC MGUE	10	653	46
UDEC P004	24	179	28
UDEC PERA	0	12	1
UDEC SANT	3	502	37
UDEC SORV	0	14	2

Un cuadro resumen para los saltos de ciclo se encuentra en la Tabla 12 :

Tabla 12 - Resumen de los saltos de ciclo

	Saltos reparados	Saltos eliminados	Ambigüedades
Sesión 1	17	2.895	347
Sesión 2	121	4.604	375

Los resultados de la Tabla 12, muestran que la mayor cantidad de saltos eliminados se produjeron en la sesión 2, la cual ya se había mencionado anteriormente como la sesión que presentaba los rms más deficientes. Luego, se hace un análisis de los saltos eliminados por cada línea base perteneciente a la red local. De esto, se tiene que en la sesión 1 se registra un promedio de 25 saltos de ciclos, y en la sesión 2 un promedio de 66 ciclos. La sesión 2 es afectada en gran parte por las observaciones del punto P004.

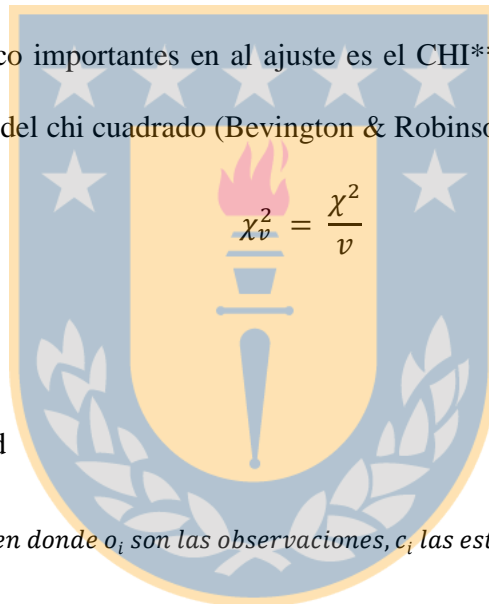
Por último, y para ambos casos se encuentra que los mayores saltos de ciclos eliminados, son los pertenecientes a las observaciones continuas.

7.3 Primeros residuales y soluciones flotantes

7.3.1 Primeros residuales

Primer ajuste por mínimos cuadrados de las dobles diferencias de fase , esto permite que no sea considerado el error del receptor. Esta primera solución es analizada conforme a eliminar *outliers*.

Uno de los estadístico importantes en al ajuste es el CHI**/DOF, el cual corresponde a una prueba reducida del chi cuadrado (Bevington & Robinson, 1992):



(40)

En donde:

v = grados de libertad

$$\chi_v^2 = \sum \frac{(O_i - C_i)^2}{\sigma_i^2} \text{ en donde } o_i \text{ son las observaciones, } c_i \text{ las estimaciones y } \sigma_i^2 \text{ es la varianza}$$

Sesión 1

Estadísticas del ajuste

Tabla 13- Estadísticas primeros residuales sesión 1

Estadísticas	
Sigma a posteriori	0,0010 m
Observaciones	247.221
Grados de libertad	246.171
Chi**/DOF	1,06

Informe de coordenadas

Tabla 14 - Informe coordenadas residuales sesión 1

Nombre Estación	Componentes	Valor a priori (m)	Valor nuevo (m)	Corrección (m)	Rms (m)
ANTC 41713S001	X	1.608.538,526	1.608.538,538	0,0119	0,0014
	Y	-4.816.370,458	-4.816.370,471	-0,0127	0,0037
	Z	-3.847.798,278	-3.847.798,300	-0,0228	0,0028
MGUE 41558M001	X	1.823.327,824	1.823.327,832	0,0080	0,0013
	Y	-4.850.352,510	-4.850.352,535	-0,0246	0,0037
	Z	-3.709.085,470	-3.709.085,497	-0,0266	0,0028
SORV	X	1.539.349,866	1.539.349,067	-0,7999	0,0019
	Y	-4.831.251,188	-4.831.251,690	-0,5016	0,0043
	Z	-3.856.429,938	-3.856.429,683	0,2551	0,0033
UDEC	X	1.537.191,327	1.537.191,344	0,0171	0,0014
	Y	-4.829.688,919	-4.829.688,933	-0,0144	0,0037
	Z	-3.859.233,099	-3.859.233,120	-0,0209	0,0028
EC01	X	1.533.684,055	1.533.683,252	-0,8032	0,0023
	Y	-4.832.445,038	-4.832.445,538	-0,4998	0,0050
	Z	-3.857.141,294	-3.857.141,035	0,2581	0,0037
MD01	X	1.534.925,843	1.534.925,045	-0,7976	0,0023
	Y	-4.831.394,058	-4.831.394,557	-0,4991	0,0047
	Z	-3.857.952,715	-3.857.952,458	0,2570	0,0036
JD01	X	1.535.011,129	1.535.010,322	-0,8066	0,0028
	Y	-4.829.933,324	-4.829.933,831	-0,5074	0,0053
	Z	-3.859.756,468	-3.859.756,212	0,2558	0,0039
SANT 41705M003	X	1.769.693,393	1.769.693,390	-0,0032	0,0014
	Y	-5.044.574,246	-5.044.574,287	-0,0417	0,0037
	Z	-3.468.320,929	-3.468.320,931	-0,0020	0,0029

Sesión 2

Estadísticas del ajuste

Tabla 15- Estadísticas residuales sesión 2

Estadísticas	
Sigma a posteriori	0,0011 m
Observaciones	231.615
Grados de libertad	230.550
Chi**/DOF	1,25

Coordenadas de las estaciones

Tabla 16- Coordenadas residuales sesión 2

Nombre Estación	Componentes	Valor a priori (m)	Valor nuevo (m)	Corrección (m)	Rms (m)
ANTC 41713S001	X	1.608538,526	1.608538,539	0,0132	0,0015
	Y	-4.816370,458	-4.816370,473	-0,0152	0,0040
	Z	-3.847798,278	-3.847798,303	-0,0258	0,0031
MGUE 41558M001	X	1.823327,824	1.823327,832	0,0074	0,0015
	Y	-4.850352,510	-4.850352,531	-0,0211	0,0040
	Z	-3.709085,470	-3.709085,492	-0,0216	0,0031
SORV	X	1.539349,866	1.539349,085	-0,7812	0,0022
	Y	-4.831251,188	-4.831251,724	-0,5358	0,0052
	Z	-3.856429,938	-3.856429,716	0,2216	0,0038
UDEC	X	1.537191,327	1.537191,344	0,0166	0,0015
	Y	-4.829688,919	-4.829688,937	-0,0178	0,0040
	Z	-3.859233,099	-3.859233,123	-0,0240	0,0031
EC01	X	1.533684,055	1.533683,251	-0,8045	0,0025
	Y	-4.832445,038	-4.832445,587	-0,5482	0,0056
	Z	-3.857141,294	-3.857141,060	0,2337	0,0041
SANT 41705M003	X	1.769693,393	1.769693,393	-0,0004	0,0015
	Y	-5.044574,246	-5.044574,295	-0,0497	0,0041
	Z	-3.468320,929	-3.468320,937	-0,0076	0,0032
P004	X	1.537338,572	1.537336,660	-1,9117	0,0022
	Y	-4.829636,581	-4.829637,003	-0,4217	0,0050
	Z	-3.859215,634	-3.859215,134	0,5002	0,0038
PERA	X	1.538449,403	1.538447,525	-1,8776	0,0020
	Y	-4.828447,532	-4.828448,077	-0,5452	0,0048
	Z	-3.860252,479	-3.860252,062	0,4171	0,0037

7.3.2 Solución flotante

Nuevo ajuste por mínimos cuadrados sobre las dobles diferencias de fase, en donde entra en teoría una mejor calidad de datos.

Sesión 1

Estadísticas

Tabla 17 - Estadísticas solución flotante sesión 1

Estadísticas	
Sigma a posteriori	0,0008 m
Observaciones	203.885
Grados de libertad	202.836
Chi**/DOF	0,72

Informe coordenadas

Tabla 18 - Informe coordenadas solución flotante sesión 1

Nombre Estación	Componentes	Valor a priori (m)	Valor nuevo (m)	Corrección (m)	Rms (m)
ANTC 41713S001	X	1.608.538,526	1.608.538,538	0,0119	0,0011
	Y	-4.816.370,458	-4.816.370,471	-0,0125	0,0030
	Z	-3.847.798,278	-3.847.798,300	-0,0225	0,0023
MGUE 41558M001	X	1.823.327,824	1.823.327,831	0,0071	0,0011
	Y	-4.850.352,510	-4.850.352,532	-0,0218	0,0030
	Z	-3.709.085,470	-3.709.085,494	-0,0243	0,0023
SORV	X	1.539.349,866	1.539.349,060	-0,8069	0,0019
	Y	-4.831.251,188	-4.831.251,690	-0,5016	0,0042
	Z	-3.856.429,938	-3.856.429,679	0,2585	0,0032
UDEC	X	1.537.191,327	1.537.191,344	0,0169	0,0011
	Y	-4.829.688,919	-4.829.688,936	-0,0175	0,0030
	Z	-3.859.233,099	-3.859.233,122	-0,0225	0,0023
EC01	X	1.533.684,055	1.533.683,248	-0,8075	0,0021
	Y	-4.832.445,038	-4.832.445,550	-0,5120	0,0047
	Z	-3.857.141,294	-3.857.141,041	0,2524	0,0034
MD01	X	1.534.925,843	1.534.925,030	-0,8128	0,0024
	Y	-4.831.394,058	-4.831.394,571	-0,5134	0,0045
	Z	-3.857.952,715	-3.857.952,464	0,2517	0,0034
JD01	X	1.535.011,129	1.535.010,320	-0,8094	0,0028
	Y	-4.829.933,324	-4.829.933,832	-0,5075	0,0053
	Z	-3.859.756,468	-3.859.756,212	0,2564	0,0039
SANT 41705M003	X	1.769.693,393	1.769.693,390	-0,0032	0,0012
	Y	-5.044.574,246	-5.044.574,286	-0,0409	0,0031
	Z	-3.468.320,929	-3.468.320,931	-0,0024	0,0024

Sesión 2

Estadísticas

Tabla 19 - Estadísticas solución flotante sesión 2

Estadísticas	
Sigma a posteriori	0,0008 m
Observaciones	187.819
Grados de libertad	186.807
Chi**/DOF	0,67

Informe coordenadas

Tabla 20 - Informe coordenadas solución flotante 2

Nombre Estación	Componentes	Valor a priori (m)	Valor nuevo (m)	Correccion (m)	Rms (m)
ANTC 41713S001	X	1.608.538,526	1.608.538,539	0,0124	0,0011
	Y	-4.816.370,458	-4.816.370,472	-0,0138	0,0029
	Z	-3.847.798,278	-3.847.798,302	-0,0247	0,0023
MGUE 41558M001	X	1.823.327,824	1.823.327,831	0,0062	0,0011
	Y	-4.850.352,510	-4.850.352,530	-0,0198	0,0029
	Z	-3.709.085,470	-3.709.085,490	-0,0205	0,0023
SORV	X	1.539.349,866	1.539.349,082	-0,7844	0,0019
	Y	-4.831.251,188	-4.831.251,704	-0,5157	0,0044
	Z	-3.856.429,938	-3.856.429,700	0,2379	0,0032
UDEC	X	1.537.191,327	1.537.191,344	0,0169	0,0011
	Y	-4.829.688,919	-4.829.688,938	-0,0189	0,0029
	Z	-3.859.233,099	-3.859.233,124	-0,0247	0,0022
EC01	X	1.533.684,055	1.533.683,252	-0,8033	0,0019
	Y	-4.832.445,038	-4.832.445,592	-0,5534	0,0043
	Z	-3.857.141,294	-3.857.141,059	0,2348	0,0031
SANT 41705M003	X	1.769.693,393	1.769.693,393	-0,0008	0,0011
	Y	-5.044.574,246	-5.044.574,293	-0,0472	0,0030
	Z	-3.468.320,929	-3.468.320,935	-0,0062	0,0023
P004	X	1.537.338,572	1.537.336,690	-1,8823	0,0071
	Y	-4.829.636,581	-4.829.637,045	-0,4637	0,0129
	Z	-3.859.215,634	-3.859.215,154	0,4796	0,0100
PERA	X	1.538.449,403	1.538.447,524	-1,8789	0,0018
	Y	-4.828.447,532	-4.828.448,066	-0,5338	0,0043
	Z	-3.860.252,479	-3.860.252,052	0,4272	0,0032

El resultado del procesamiento de las dobles diferencias de los primeros residuales (primera solución dobles diferencias de fase) para la sesión 1, arroja una varianza a posteriori de 0,001 m, un χ^2/DOF de 1.06, 246171 grados de libertad y 247221 observaciones. Además se obtuvo, un promedio en rms de 1.9 mm en X, 4.3 mm en Y, y 3.2 mm en Z. El resultado fue mejorado, tras la extracción de observaciones que fueron consideradas como outlier. Esto último, tras el uso de los programas de reporte estadístico (RESRMS) y de eliminación de observaciones (SATMARK). Con ello se obtiene la primera solución flotante, la cual tiene como resultados una varianza a posteriori de 0.0008 m, un χ^2/DOF de 0,72 m, 202836 grados de libertad y 203885 observaciones. Luego se tiene un promedio rms por componente de 1.7 mm, 3.9 mm y 2.9 mm para las componentes X,Y y Z respectivamente.

Por otro lado el resultado de los residuales en la sesión 2, se muestra una varianza a posteriori de 0.0011 m, un χ^2/DOF de 1.25, 230550 grados de libertad y 231615 observaciones. Luego un promedio de rms por componente de 1.9 mm ,4.6 mm y 3.5 mm en X,Y y Z. Luego del tratamiento, se obtiene un resultado de un sigma a posteriori de 0.0008 m, un χ^2/DOF de 0.67 , 186807 grados de libertad y 187819 observaciones. Luego presenta un rms por componente de 2.1 mm, 4.7 mm y 3.6 mm en las componentes X,Y y Z, respectivamente. En ambos casos, las soluciones flotantes muestran una mejor solución que la estudiada para la extracción de los primeros residuos.

7.4 Resolución ambigüedades

La resolución se llevo a cabo con la estrategia SIGMA, utilizando las frecuencias L1&L2 en conjunto a L5. Los valores presentados hacen alusión a la línea base involucrada, su

longitud, su número de ambigüedades no resueltas antes de la aplicación del algoritmo, el número de ambigüedades no resueltas después del algoritmo y su respectivo porcentaje de mejoría.

Sesión 1

Tabla 21 - Resolución de ambigüedades sesión 1

Línea base	Longitud (Km)	Antes	Después	% mejoría
ANTC SORV	71,295	22	1	95,5
EC01 MD01	1,818	68	22	67,6
EC01 UDEC	4,927	38	4	89,5
JD01 MD01	2,323	90	13	85,6
JD01 UDEC	2,255	62	21	66,1
MD01 UDEC	3,111	72	18	75
SORV UDEC	3,868	42	2	95,2
UDEC EC01	4,928	38	4	89,5
UDEC JD01	2,255	62	21	66,1
UDEC MD01	3,111	72	18	75
UDEC SORV	3,868	19	2	95,3
ANTC MGUE	257,935	89	8	91
ANTC UDEC	73,475	90	2	97,8
MGUE SANT	313,953	46	9	80,4
MGUE UDEC	323,798	90	7	92,2
UDEC ANTC	73,475	90	2	97,8
UDEC MGUE	323,798	90	10	88,9
UDEC SANT	503,036	45	9	80

Sesión 2

Tabla 22 - Resolución de ambigüedades sesión 2

Línea Base	Longitud (Km)	Antes	Después	% mejoría
P004 PERA	1,929	58	21	63.8
P004 SORV	3,796	54	14	74.1
P004 UDEC	0,157	62	19	69.4
PERA UDEC	2,040	48	5	89.6
SORV UDEC	3,868	40	13	67.5
UDEC EC01	4,927	42	2	95.2

UDEC	MD01	3,112	72	18	75,0
UDEC	P004	0,157	62	25	59,7
UDEC	PERA	2,040	48	5	89,6
UDEC	SORV	3,868	40	4	90,0
MGUE	UDEC	323,8	92	14	84,8
ANTC	MGUE	257,9	84	12	85,7
ANTC	UDEC	73,48	81	3	96,3
MGUE	SANT	314	60	23	61,7
UDEC	ANTC	73,48	81	3	96,3
UDEC	MGUE	323,8	92	14	84,8
UDEC	SANT	503	60	25	58,3
ANTC	SORV	71,3	21	3	85,7

Los resultados de la resolución de ambigüedades muestran la efectividad de la metodología empleada. Dicha estrategia es representada por el algoritmo SIGMA, utilizando la combinación lineal L5 para líneas bases mayores (red global), y L1&L2 en aquellas comprendidas en la red local. En la sesión 1, se pudo resolver en promedio un total de un 84.92 % de las ambigüedades, mientras que en la sesión 2 se pudo resolver un promedio de un 81.7 % de las ambigüedades.

7.5 Solución final (combinación de soluciones)

Combinación de las ecuaciones normales de las sesiones 1 y 2.

Estadísticas

Tabla 23 - Estadísticas solución final

Estadísticas	
Sigma a posteriori	0,0008 m
Observaciones	391.748
Grados de libertad	390.156
Chi**/DOF	0,7
Parámetros ajustados	1592

Informe de coordenadas

Estas coordenadas están referidas a la época de observación. En el anexo se muestran las coordenadas referidas a una época de definición 2013,0.

Tabla 24 - Informe coordenadas solución final

Nombre Estación	Componentes	Valor a priori (m)	Valor nuevo (m)	Correccion (m)	Rms (m)
ANTC 41713S001	X	1.608.538,526	1.608.538,531	0,0048	0,0005
	Y	-4.816.370,458	-4.816.370,448	0,0105	0,0005
	Z	-3.847.798,278	-3.847.798,284	-0,0066	0,0005
EC01	X	1.533.684,055	1.533.683,237	-0,8188	0,0008
	Y	-4.832.445,038	-4.832.445,544	-0,5058	0,0015
	Z	-3.857.141,294	-3.857.141,036	0,2574	0,0013
JD01	X	1.535.011,129	1.535.010,310	-0,8187	0,0010
	Y	-4.829.933,324	-4.829.933,804	-0,4803	0,0020
	Z	-3.859.756,468	-3.859.756,193	0,2753	0,0017
MD01	X	1.534.925,843	1.534.925,031	-0,8113	0,0010
	Y	-4.831.394,058	-4.831.394,518	-0,4602	0,0019
	Z	-3.857.952,715	-3.857.952,439	0,2762	0,0016
MGUE 41558M001	X	1.823.327,824	1.823.327,823	-0,0010	0,0004
	Y	-4.850.352,510	-4.850.352,507	0,0033	0,0005
	Z	-3.709.085,470	-3.709.085,474	-0,0044	0,0005
P004	X	1.537.338,572	1.537.336,664	-1,9083	0,0024
	Y	-4.829.636,581	-4.829.637,033	-0,4521	0,0054
	Z	-3.859.215,634	-3.859.215,168	0,4659	0,0041
PERA	X	1.538.449,403	1.538.447,511	-1,8924	0,0010
	Y	-4.828.447,532	-4.828.448,022	-0,4905	0,0022
	Z	-3.860.252,479	-3.860.252,034	0,4453	0,0017
SANT 41705M003	X	1.769.693,393	1.769.693,381	-0,0121	0,0005
	Y	-5.044.574,246	-5.044.574,265	-0,0195	0,0006
	Z	-3.468.320,929	-3.468.320,913	0,0160	0,0005
SORV	X	1.539.349,866	1.539.349,064	-0,8023	0,0008
	Y	-4.831.251,188	-4.831.251,669	-0,4810	0,0017
	Z	-3.856.429,938	-3.856.429,674	0,2636	0,0014
UDEC	X	1.537.191,327	1.537.191,336	0,0091	0,0004
	Y	-4.829.688,919	-4.829.688,913	0,0060	0,0005
	Z	-3.859.233,099	-3.859.233,105	-0,0060	0,0005

La combinación de las sesiones da como resultado una solución final, en la que se tiene un sigma a posteriori de 0.0008 m, un Chi**/DOF de 0.7, 390156 grados de libertad y 391748 observaciones. El estadístico Chi**/DOF es considerado en los grandes centros de procesamiento como un indicador de la calidad global del ajuste. En efecto, el estadístico corresponde a una prueba reducida de chi cuadrado, en donde un número cercano a 1 representa una coincidencia entre la varianza a priori y estimada (Bevington & Robinson, 1992), así entonces, se considera el ajuste que pasa la prueba estadística. Adicionalmente, el hecho de haber realizado una combinación de las soluciones conforme a sesiones de distintos días, es una suerte de validación del trabajo realizado, esto considerando un buen resultado conforme a distintas condiciones climáticas y del instrumental utilizado. En este contexto, si hubiese algún error grosero en la etapa de toma de observaciones como en la de procesamiento para ambas sesiones, no sería posible un buen resultado para la combinación de las soluciones.

Una distribución de los rms por componentes es mostrado en las figuras (19) , (20) y (21):

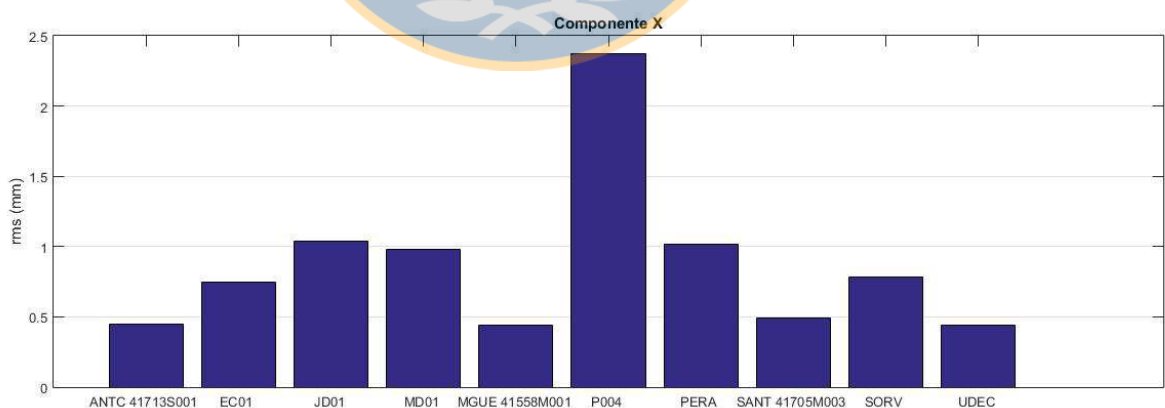


Figura 22 - Componente X rms

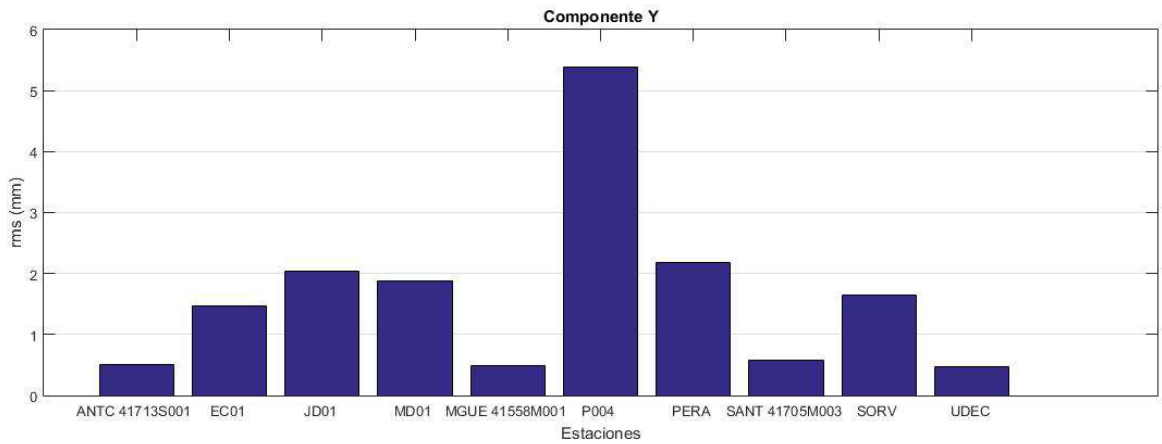


Figura 23 - Componente Y rms

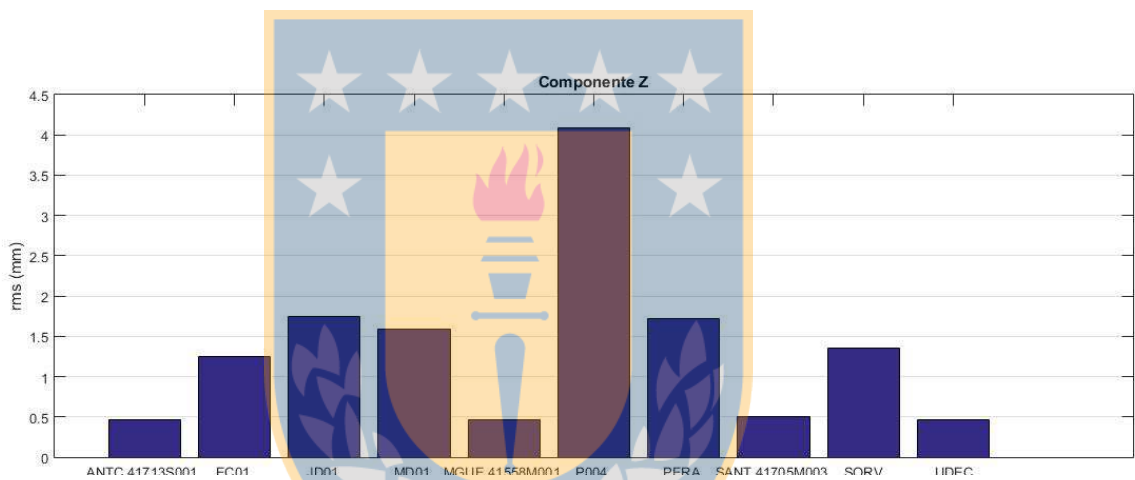


Figura 24 - Componente Z rms

El análisis del rms por componente de cada estación (figuras 22, 23 y 24), muestra un bajo error para las estaciones fiduciales (continuas), esto debido a que su error fue añadido como *constrained* en el ajuste. Luego se ve para el resto de las estaciones (red local) una dispersión relativamente homogénea, con excepción del punto P004. Dicho punto mencionado podría ser considerado como un *outlier*, en donde ya se habían aparecido ciertos problemas desde la etapa del procesamiento de las simples diferencias. El procesamiento podría ser mejorada excluyendo esta observación, pero para efecto de este caso de estudio, la idea es implementar una red con toda la monumentación

establecida anteriormente (Flores,2015), es por ello que se queda con la mejor solución que incluya dicho punto (P004).

Po último, se tiene que una red de primer orden es aquella alcanza una precisión de 1:100000 (Bossler,1984). Dicho esto, se tiene la precisión para cada una de las líneas bases que fueron consideradas para el procesamiento (Tabla 25).

Tabla 25 - Tolerancia de líneas bases

Línea Base	1: a	Línea base	1: a
ANTC MGUE	258.000.000	ANTC MGUE	322.500.000
ANTC SORV	50.714.286	ANTC SORV	50.714.286
ANTC UDEC	66.363.636	ANTC UDEC	663.63.636
EC01 MD01	1.538.462	EC01 UDEC	4.545.455
EC01 UDEC	4.545.455	MGUE SANT	448.571.429
JD01 MD01	1.428.571	MGUE UDEC	294.545.455
JD01 UDEC	1.666.667	P004 PERA	714.286
MD01 UDEC	2.142.857	P004 SORV	1.379.310
MGUE SANT	392.500.000	P004 UDEC	185.185
MGUE UDEC	270.000.000	PERA UDEC	1.333.333
SORV UDEC	2.500.000	SORV UDEC	2.500.000
UDEC ANTC	66.363.636	UDEC ANTC	66.363.636
UDEC EC01	4.545.455	UDEC EC01	4.545.455
UDEC JD01	1.666.667	UDEC MGUE	294.545.455
UDEC MD01	2.142.857	UDEC P004	185.185
UDEC MGUE	270.000.000	UDEC PERA	1.333.333
UDEC SANT	558.888.889	UDEC SANT	558.888.889
UDEC SORV	2.500.000	UDEC SORV	2.500.000

Para las 36 líneas bases escogidas, se tiene que se alcanza y supera con creces la tolerancia exigida según los estándares de la FGCC y Bossler (1984). Esto último, afirma el establecimiento de una red de primer orden para la ciudad de Los Ángeles.

7.6 Comparación red 2015

Es difícil hacer una comparación de los resultados de ambos procesamientos, debido básicamente a que ambos conforman dos procesamientos distintos. La red 2015, sólo contempla las estaciones locales, mientras que la actual (2016) contempla un procesamiento de estaciones SIRGAS, además la red de 2015 procesa de manera que UDEC es considerado un punto sin error, mientras que en este caso de estudio si se añade un error. No obstante se analizarán los puntos en común en base a las coordenadas y líneas bases.

La comparación es resumida en la Tabla 26, en ella se establece un rms más alto en la red del 2015, esto es una tendencia que se sigue en cada componente. Por otro lado, se muestra un cierto error aleatorio en las coordenadas.

Tabla 26 - Comparación red 2015 de coordenadas

Nombre Estación	Componentes	Red 2016 (m)	Rms (m)	Red 2015 (m)	rms (m)	Dif. coordenadas (m)	Dif. Rms (m)
EC01	X	1.533.683,237	0,0008	1.533.683,235	0,0025	0,002	-0,0018
	Y	-4.832.445,544	0,0015	-4.832.445,553	0,0034	0,009	-0,0019
	Z	-3.857.141,036	0,0013	-3.857.141,046	0,0033	0,010	-0,0021
JD01	X	1.535.010,310	0,0010	1.535.010,319	0,0029	-0,009	-0,0019
	Y	-4.829.933,804	0,0020	-4.829.933,849	0,0028	0,045	-0,0008
	Z	-3.859.756,193	0,0017	-3.859.756,223	0,0018	0,030	-0,0001
P004	X	1.537.336,664	0,0024	1.537.336,663	0,0030	0,001	-0,0006
	Y	-4.829.637,033	0,0054	-4.829.637,028	0,0051	-0,005	0,0003
	Z	-3.859.215,168	0,0041	-3.859.215,151	0,0051	-0,017	-0,0010
PERA	X	1.538.447,511	0,0010	1.538.447,498	0,0019	0,013	-0,0009
	Y	-4.828.448,022	0,0022	-4.828.447,985	0,0033	-0,037	-0,0011
	Z	-3.860.252,034	0,0017	-3.860.251,999	0,0030	-0,035	-0,0013
SORV	X	1.539.349,064	0,0008	1.539.349,050	0,0031	0,014	-0,0023
	Y	-4.831.251,669	0,0017	-4.831.251,686	0,0058	0,017	-0,0042
	Z	-3.856.429,674	0,0014	-3.856.429,697	0,0049	0,023	-0,0036

Las líneas bases son analizadas en la Tabla 27, respecto a esto se encuentra un error sistemático, en donde las líneas bases procesadas por Bernese muestran un longitud mayor.

Tabla 27- Comparación de líneas bases 2015

Líneas bases		Longitud red 2016 (m)	Longitud red 2015 (m)	dif (m)
EC01	JD01	3861,218	3861,212	0,0060
UDEC	EC01	4927,731	4927,733	0,0133
UDEC	JD01	2256,206	2256,210	0,0547
UDEC	P004	155,349	155,352	0,0178
UDEC	SORV	3867,457	3867,439	0,0311
UDEC	PERA	2038,627	2038,624	0,0531
P004	PERA	1929,460	1929,464	0,0388
P004	SORV	3796,812	3796,785	0,0477

En vista de lo presentado, es notoriamente visible las discrepancias en las longitudes de las líneas bases, lo que a su vez repercute en las coordenadas finales.

Finalmente aunque las escalas de trabajo eran muy distantes, el procesamiento con Bernese presentó una mejor precisión en las componentes de los puntos en común de la red.

8 Conclusiones y recomendaciones

En este proyecto se estableció una red geodésica, la cual destaca por la implementación de una estrategia científica, conforme a las labores de *post* procesamiento de las observaciones de tipos GNSS. Dicha estrategia destaca por el uso del software científico Bernese 5.2. Su utilización incluyó el estudio de una serie de correcciones y estrategias para realizar un procesamiento que garantizara consistencia y precisión, basándose fuertemente en fundamentos geodésicos. Cada etapa fue analizada minuciosamente, las cuales van desde; la **extrapolación de la época de referencia** de las estaciones fiduciales; las correcciones de la posición de la órbita; la sincronización de los relojes; la formación de las líneas bases y su procesamiento; el ajuste de las dobles diferencias; las estrategias para resolver ambigüedades; la combinación de las soluciones a través de las ecuaciones normales y el posterior **regreso de las coordenadas a la época de referencia** conforme a SIRGAS 2013.0.

Los resultados arrojados muestran un desglose de las etapas del procesamiento, en *post* de búsqueda de mejoras de las propias soluciones. Finalmente se obtuvieron soluciones que hacen referencia a **coordenadas geocéntricas** vinculadas al marco de referencia regional SIRGAS 2000, en una época de definición 2013.0, el cual a su vez es consistente con el ITRF 2008. Todo lo anterior utilizando modelo de velocidades y coordenadas VEMOS 2015. Las coordenadas finales son definidas en conjunto a su debido error del ajuste realizado. También es bueno señalar, que la estimación de coordenadas de la red geodésica es complementaria a la red de Flores (2015), de manera que se puede añadir con mayor precisión la componente vertical.

En síntesis, se puede afirmar que se ha implementado una red geodésica de alta precisión en la ciudad de Los Ángeles, cumpliendo con los estándares de una red horizontal de primer orden según Bossler (1984).

El trabajo realizado además abre la puerta a múltiples estudios que puedan realizarse a futuro. Por un lado la estrategia de post procesamiento empleada puede ser potenciada y ampliada mediante procesamientos automáticos, de manera tal que se puedan realizar estudios de deformaciones, modelados de la componente húmeda de la troposfera, modelados de la ionosfera u otros tipos de procesamiento GNSS que optimicen o que puedan sacarle el máximo provecho a las observaciones de tipo GNSS. Así entonces, el procesamiento mediante el uso del software científico Bernese 5.2, apunta a que sea un trabajo que motive a más investigaciones en este ámbito.

Por otro lado, el trabajo realizado contribuye a la ciudad de Los Ángeles una estructura geodésica de primer orden, la cual queda abierta para ser utilizada en ámbitos de obras civiles u otros fines que sean beneficios para la ciudadanía. Además, la estructura generada se convierte en una estructura propia de la carrera Ingeniería Geomatica, la cual es una de las carreras universitarias con mayor tradición en la ciudad de Los Ángeles. En este sentido, la generación de esta estructura geodésica no solo puede ser vista como una piedra inicial para numerosos estudios de multipropósito, sino que también puede verse con una connotación de identidad propia para la carrera Ingeniería Geomatica.

Finalmente, este trabajo enfatiza una aplicación de la Geomática sustentándose en fundamentos y métodos de la Geodesia. Por esta razón, un procesamiento a través de un software científico, se torna en un proceso dificultoso. Sin embargo, las competencias de un Geomatico lo hacen un profesional adecuado para la realización de las labores

relacionadas a este ámbito. En este sentido, la Geomatica puede ser vista como una vía para la búsqueda de mejoras relacionadas a la alta calidad de resultados, presentándose como un nexo entre lo teórico y el desarrollo tecnológico.



9 Referencias

- Aloi, D. N. 1999. Phase Center Variation (PCV) Determination of the Ohio University Dipole Array Using GPS Data. Proc. ION GPS-99, Nashville, 705-712
- Álvarez, D.A.G. (2008). Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System). *Universidad Autónoma de Madrid*.
- Bauersima, I. (1983). NAVSTAR/Global Positioning System (GPS).(II). Radiointerferométrische Satellitenbeobachtungen. *Mitt. Satell.-Beobachtungsstn. Zimmerwald, Nr. 10, 112 pp., 10.*
- Beutler, G., Bauersima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., & Geiger, A. (1988). Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations. Atmospheric effects on geodetic space measurements, monograph, 12, 15-43.
- Bevington, P. R., & Robinson, D. K. (2003). Data reduction and error analysis. *McGraw-Hill*.
- Brunini, C. (2007). SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. La Plata, Argentina Simposio "IDE América: Conceptos, Prácticas y Proyectos" IPGH-IGAC, Bogotá.
- Brunini, C., Sánchez, L., Drewes, H., Costa, S., Mackern, V., Martínez & Da Silva, A. (2012). Improved analysis strategy and accessibility of the SIRGAS Reference Frame. In Geodesy for planet earth (pp. 3-10). Springer Berlin Heidelberg.
- Bruns, H. (1878). Die figur der erde. Berlin, P. Stankiewicz, 1878., 1.

- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., & Meindl, M. (2007). Bernese GPS software version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern, 640, 114.
- Deng, X. (2015). Geodesy–Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems. *Journal of Spatial Science*, 60(1), 198-200.
- Dzurisin, D. (2006). *Volcano deformation: new geodetic monitoring techniques*. Springer Science & Business Media.
- Eichhorn, H. (1974). *Astronomy of star positions*.
- Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., Bastian, U., Bien, R., Burkhardt, G., ... & Röser, S. (1988). Fifth fundamental catalogue (FK5). Part 1: The basic fundamental stars. *Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg*, 32, 1-106.
- Gamboa, J. M. M. (2006). *Geodesia y topografía: curso de oficiales, especialidad de hidrografía*.
- Gopi, S. (2005). *Global positioning System: Principles and applications*. Tata McGraw-Hill Education.
- Heitz, S. (1988). *Coordinates in geodesy*. Berlin; New York: Springer-Verlag, c1988., 1.
- Helmert, F. R. (1872). *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate: mit Anwendungen auf die Geodäsie und die Theorie der Messinstrumente (Vol. 1)*. BG Teubner.
- Helmert, F. R. (1884). *Die mathematischen und physikalischen theorieen der höheren geodäsie.. (Vol. 2)*. BG Teubner.

- Helmert, F. R. (1980). Mathematical and physical theories of higher geodesy. Geosciences Branch, Chart Research Division, Aeronautical Chart and Information Center.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2012). Global positioning system: theory and practice. Springer Science & Business Media.
- Hopfield, H.S. 1969. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. *J. Geophys. Res.*, 74(18), 4487-4499.
- IERS Conventions. 1996. IERS Technical Note 21. McCarthy, D. D. (Ed.) Observatoire de Paris, July, 95p.
- J. Boehm, A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh (2006), Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Jekeli, C. (2001). Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter.
- Jekeli, C. (2006). Geometric reference systems in geodesy. Report, Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, Ohio State University.
- Kyle Snow, B 2002. Applications of parameter and hypothesis to GPS network adjustment. Geodetic and GeoInformation Science Department of civil and environmental engineering and Geodetic Science The Ohio State University. Columbus, Ohio 43210-1275
- Langley, R. B. 1996. GPS Receivers and the Observables. *Lecture Notes in Earth Sciences* (60): GPS for Geodesy, A. Kleusberg and P. J. G. Teunissen (Eds.), Springer-Verlag, 141-173.

- Leick, A. (2004). GPS satellite surveying. A Wiley–Interscience publication. United States of America.
- Mader, G. L. 1999. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. GPS Solutions, 3(1), 50-58.
- Marini, J.W. 1972. Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile. Radio Sci., 7(2), 223-231.
- Mendes, V. B. 1998. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. Thesis. Univ. New Brunswick, p.353.
- Mueller, I. I. (1969). Spherical and practical astronomy, as applied to geodesy. New York, F. Ungar Pub. Co.[1969], 1.
- Mueller, I. I. (1989). Reference coordinate systems: An update. In Theory of Satellite Geodesy and Gravity Field Determination (pp. 153-196). Springer Berlin Heidelberg.
- Musman, S., G. Mader, and C. E. Dutton. 1998. Total Electron Content Changes in the Ionosphere During the January 10, 1997 Disturbance. Geophys. Res. Lett., 25(15), August, 3055-3058.
- Niell, A. E. 1996. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. J. Geophys. Res., 101(B2), 3227-3246 Niell, A. E. 1996. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. J. Geophys. Res., 101(B2), 3227-3246
- Oberti, M. V. M. (2005). Redes de estaciones permanentes GPS: una respuesta al problema de materializar el sistema de referencia terrestre. ANI-Academia Nacional de Ingeniería.

- Parkinson, B., Spilker, J. J., Axelrad, P., & Enge, P. (1996). GPS: theory and applications, vols 1 and 2. AIAA, Washington, DC.
- Saasamoinen, J. 1971. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite. Int. Symp. on the Use of Artificial Satellite, Henriksen (ed.), 3rd Washington, 247-251
- Sánchez L., Drewes H. (2016): VEMOS2015: Velocity and deformation model for Latin America and the Caribbean, doi: 10.1594/PANGAEA.863131
- Scherneck H. G. and F. H. Webb. 1998. Ocean Tide Loading and Diurnal Tidal Motion of the Solid Earth Center. IERS (1998) Technical Note No. 25
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Walter de Gruyter.
- Segall, P., & Davis, J. L. (1997). GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1), 301-336.
- Seidelmann, P. K. (2005). *Explanatory supplement to the astronomical almanac*. University Science Books.
- Senus, W. J. (1985). Navstar Global Positioning System overview. *Marine Geodesy*, 9(July), 131–132. <https://doi.org/10.1080/15210608509379521>
- Soto, J., Bataille, K., & Contreras, M. (2006). Monitoreamiento Automático De Deformaciones De La Estación Tigo De Concepción, Por Medio De Observaciones Gps Entre. *Cartografía.Cl*, (1). Retrieved from http://www.cartografia.cl/download/baez_juan_carlos.pdf

- Tong, X., Sandwell, D., Luttrell, K., Brooks, B., Bevis, M., Shimada, M., ... & Blanco, M. (2010). The 2010 Maule, Chile earthquake: Downdip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophysical Research Letters*, 37(24).
- Torge, W., & Müller, J. (2012). *Geodesy*. Walter de Gruyter.
- United States. Federal Geodetic Control Committee, & Bossler, J. D. (1984). Standards and specifications for geodetic control networks. Federal Geodetic Control Committee.
- Vanicek, P., & Krakiwsky, E. J. (1982). *Geodesy: the Concepts*.
- Vanicek, P., & Krakiwsky, E. J. (2015). *Geodesy: the concepts*. Elsevier.
- Witchayangkoon, B. (2000). *Elements of gps precise point positioning*. Library, 286.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3282.6402>
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (1997). *Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS*. Wiley-Interscience.
- Wubben, G., M Schmitz, F. Menge, G. Seeber. 1997. A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. *Navigation: J. the Inst. of Navigation*, 44(2), Summer, 247-255.
- Zinoviev, A. E. (2005, September). Using GLONASS in combined GNSS receivers: current status. In *Proceedings of ION GNSS* (pp. 1046-1057).
- Zlotnicki, V. 1996. Which Tide? (Some definitions of Pure Ocean Tide, Earth (Body and Loading) Tide, Long Period Tide, Internal Tide, Atmospheric Tide and Pole Tide).
http://podaac.jpl.nasa.gov/cdrom/tide/Document/text/tide_is.txt.

10 Anexos

Coordenadas en época de definición (2013.0). Utilizando modelo de velocidades VEMOS 2015. Los puntos de la red local fueron calculados con las velocidades de UDEC.

Estación	X (m)	Y(m)	Z(m)
ANTC 41713S001	1608538,608	-4816370,332	-3847798,315
EC01	1533683,314	-4832445,469	-3857141,070
JD01	1535010,387	-4829933,729	-3859756,227
MD01	1534925,109	-4831394,443	-3857952,473
MGUE 41558M001	1823327,901	-4850352,443	-3709085,522
P004	1537336,741	-4829636,958	-3859215,202
PERA	1538447,588	-4828447,948	-3860252,068
SANT 41705M003	1769693,350	-5044574,240	-3468320,953
SORV	1539349,141	-4831251,594	-3856429,708
UDEC	1537191,414	-4829688,838	-3859233,139





VÉRTICE RED DE CONTROL HORIZONTAL SIRGAS 2013,0



DATUM : WGS84	ÉPOCA : 2013,0	UNIDADES : Metros	
CIUDAD : Los Ángeles	NOMBRE : PERA	AÑO : 2016	
LATITUD : S 37°29'02.32346"	LONGITUD : W 72°19'37.19855"	ALTURA ELIPSOIDAL: 162.327	
Sistema Proyección: UTM 18 S	NORTE : 5848079,860	ESTE : 736339,587	ALTURA NMM: 142.990

DESCRIPCIÓN: **Monolito de hormigón estándar de 30x30 y en el centro un perno.**

LOCALIZACIÓN: **Ubicado en el bandejón central frente a una distribuidora de gas licuado, en la Av. Francisco Encina, llegando a la Av. Las Industrias. Sector Pallihue.**



REALIZO: **Iván Rivera**



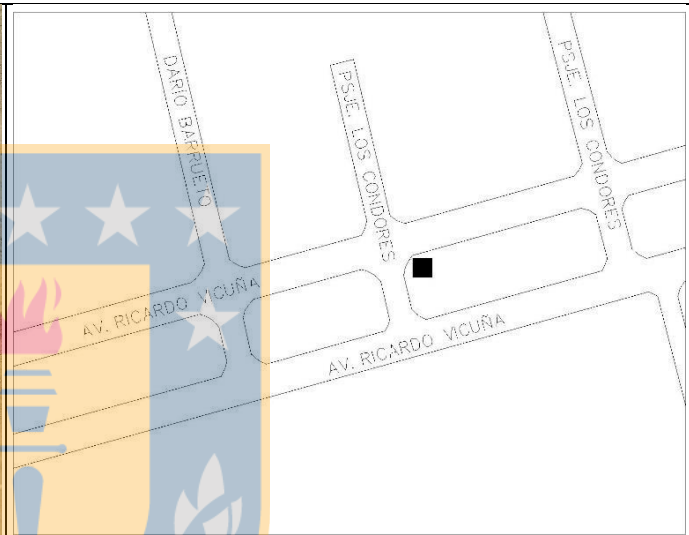
VÉRTICE RED DE CONTROL HORIZONTAL SIRGAS 2013,0



DATUM : WGS84	ÉPOCA : 2013,0	UNIDADES : Metros	
CIUDAD : Los Ángeles	NOMBRE : P004	AÑO : 2016	
LATITUD : S 37°28'19.92715"	LONGITUD : W 72°20'34.96194"	ALTURA ELIPSOIDAL: 163.116	
SISTEMA PROYECCIÓN: UTM 18 S	NORTE 5849426,953	ESTE : 734957,529	ALTURA NMM: 143.692

DESCRIPCIÓN: **Monolito circular relleno de hormigón y en el centro un perno, formato único.**

LOCALIZACIÓN: **Está ubicado en la intersección del pasaje Los Cóndores con la Avenida Ricardo Vicuña, en una esquina del bandejón central.**



REALIZO: **IVÁN RIVERA.**



VÉRTICE RED DE CONTROL HORIZONTAL

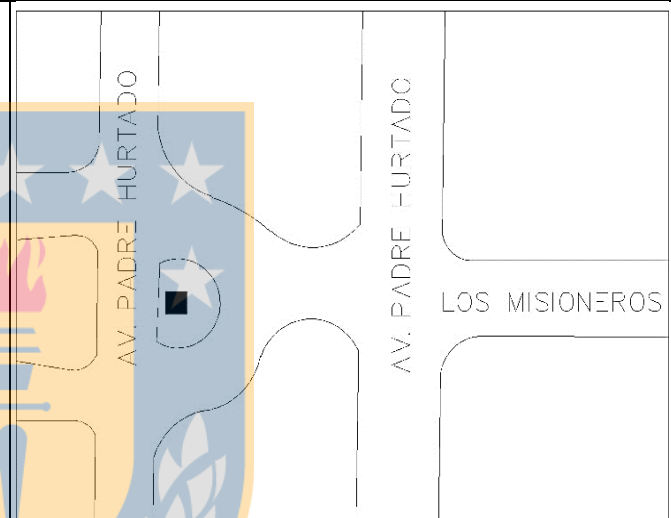
SIRGAS 2013,0



DATUM : WGS84	ÉPOCA : 2013,0	UNIDADES : Metros	
CIUDAD : Los Ángeles	NOMBRE : JD01	AÑO : 2016	
LATITUD : S 37°28'42.18809"	LONGITUD : W 72°22'08.84683"	ALTURA ELIPSOIDAL: 157.146	
SISTEMA PROYECCIÓN: UTM 18 S	NORTE 5848805,550	ESTE : 732631,717	ALTURA NMM: 137.809

DESCRIPCIÓN: **Monolito de hormigón estándar de 30x30 y en el centro un perno.**

LOCALIZACIÓN: **Ubicado en la rotonda que se genera en la intersección de la Av. Padre Hurtado con calle Los Misioneros. Sector Villa Galilea.**



REALIZO: **Iván Rivera Sánchez**



VÉRTICE RED DE CONTROL HORIZONTAL

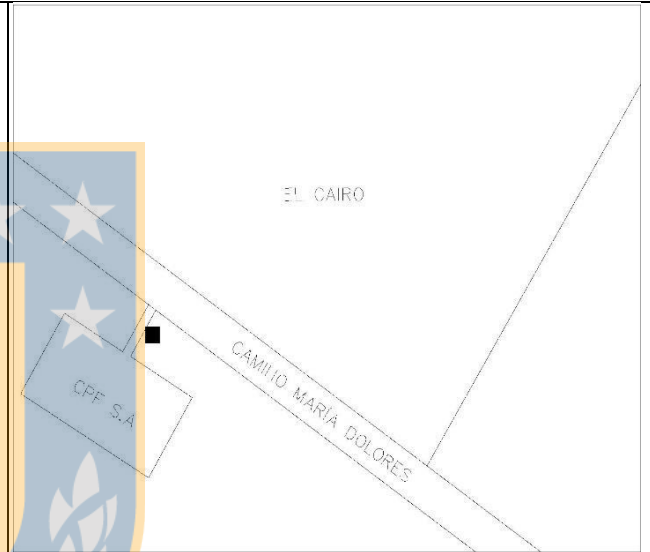
SIRGAS 2013,0



DATUM : WGS84	ÉPOCA : 2013,0	UNIDADES : Metros	
CIUDAD : Los Ángeles	NOMBRE : EC01	AÑO : 2016	
LATITUD : S 37°26'55.55508"	LONGITUD : W 72°23'31.25138"	ALTURA ELIPSOIDAL: 147.716	
SISTEMA PROYECCIÓN: UTM 18 S	NORTE: 5852148.936	ESTE : 730698.387	ALTURA NMM: 128.314

DESCRIPCIÓN: **Monolito realizado con un perno coche instalado sobre hormigón, formato único.**

LOCALIZACIÓN: **Ubicado a un costado del Camino María Dolores, específicamente en la vereda que da acceso a la empresa denominada "Controladora de plagas forestales".**



REALIZO: **Iván Rivera Sánchez**



VÉRTICE RED DE CONTROL HORIZONTAL

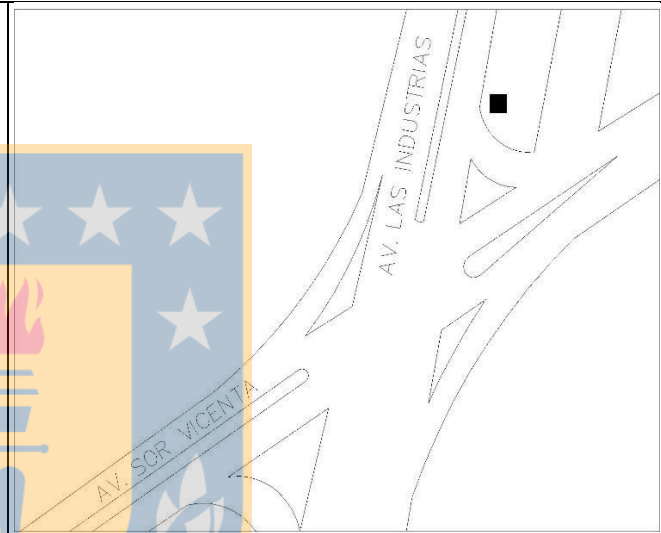
SIRGAS 2013,0



DATUM : WGS84	ÉPOCA : 2013,0	UNIDADES : Metros	
CIUDAD : Los Angeles	NOMBRE : SORV	AÑO : 2016	
LATITUD : S 37°26'25.81286"	LONGITUD : W 72°19'36.87944"	ALTURA ELIPSOIDAL: 175.124	
SISTEMA PROYECCIÓN: UTM 18 S	NORTE: 5.852.904,248	ESTE: 736.484,450	ALTURA NMM: 155.668

DESCRIPCIÓN: **Monolito de hormigón estándar de 30x30 y en el centro un perno.**

LOCALIZACIÓN: **Ubicado en las proximidades a la virgen situada en la intersección de la Av. Sor Vicenta con la Av. Las Industrias.**



REALIZO: **Iván Rivera Sánchez**