
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y
Arquitectura



VNiVERSIDAD
D SALAMANCA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual
Preciso. (PPP: Precise Point Positioning)

Tutora:

Ana Belén Gonzalo Calderón

Presentado por:

John Alexander Orduña Diaz

4 de octubre de 2019

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Universidad de Salamanca, por haberme brindado la oportunidad de cursar el Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, ya que en este espacio pude traspasar fronteras del conocimiento, que antes no estaban a mi alcance, y que hoy me permiten fortalecer y crecer a nivel profesional en el campo de la Geomática.

Al cuerpo docente del Máster, por compartir sus conocimientos, experiencia y aportes significativos en el desarrollo de las nuevas Geotecnologías y por supuesto por sus indicaciones y correcciones recibidas oportunamente. A la tutora del TFM, mil gracias por su orientación y calidad humana.

Por último, pero no menos importante a mi esposa, mis hijos en especial a Santiago, que permitieron que la culminación del Máster fuera posible.

Índice general

Capítulos	Página
Agradecimientos	3
Resumen	10
Lista de acrónimos	11
1. Introducción.	13
1.1. Estado del arte.	14
2. Objetivos.	16
3. Contexto general del trabajo.	17
3.1. Descripción de GNSS.	17
3.1.1. Componentes GNSS.	18
3.1.2. Principio de posicionamiento por satélites.	19
3.2. La señal GNSS.	20
3.3. Observables.	20
3.3.1. Pseudodistancia.	21
3.3.2. Medidas de fase.	24
3.4. Fuentes de error GNSS.	26
3.5. Descripción de modelos matemáticos utilizados en PPP.	26
3.5.1. Error en los relojes en GNSS.	27
3.5.2. Determinación de la órbita precisa.	27
3.5.3. Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera.	28
3.5.4. Pérdida del ciclo y multipath.	32
3.5.5. Efectos de sitio, cargas y mareas.	33
3.5.6. Retardos y Offsets dependientes de la antena	34
3.5.7. Polarización en la señales por la actitud del satélite: Phase Wind- Up.	35
3.5.8. Retardos de la señal no calibrados y bias entre observables.	36
3.6. Métodos de observación y posicionamiento GNSS.	36
3.6.1. Posicionamiento Absoluto.	37
3.6.2. Posicionamiento Diferencial o Relativo.	38
3.7. Concepto teórico de PPP.	38
3.8. Modelos matemáticos de PPP.	39
3.8.1. Combinación libre de ionosfera.	41
3.8.2. Modelo lineal de observación en PPP.	43
3.9. Características de PPP.	44
3.9.1. Aplicaciones.	44

3.9.2. Ventajas y Desventajas	45
4. Instrumentación.	47
4.1. Software para procesamiento diferencial de datos GNSS.	47
4.1.1. Trimble Business Center (TBC).	47
4.2. Servicios en línea para procesamiento absoluto de datos GNSS.	48
4.2.1. Automatic Precise Positioning Service (APPS).	50
4.2.2. Canadian Spatial Reference System PPP (CSRS-PPP).	52
4.2.3. GNSS Analysis and positioning software (GAPS).	53
4.2.4. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).	55
4.2.5. MagicGNSS.	55
4.2.6. Trimble RTX.	56
4.2.7. Online Positioning User Service (OPUS).	56
4.2.8. GPS data processing service provided by Geoscience Australia (AUSPOS).	58
4.2.9. GEOLan DONOSTI SL.	59
4.3. Software para procesamiento absoluto de datos GNSS.	60
4.3.1. BERNESE.	61
4.3.2. GAMIT/GLOBK.	61
4.3.3. GIPSY-OASIS.	62
4.3.4. RTKLIB.	63
4.3.5. (gLAB) GNSS-Lab Tool.	63
4.4. PPP en Tiempo Real.	64
4.4.1. IGS Real Time Pilot Project (IGS-RTPP).	64
4.4.2. Global Differential GPS (GDGPS).	64
4.4.3. Real-Time System for Clock Estimation (RETICLE).	65
4.5. PPP Regional.	65
5. Metodología.	67
5.1. Cronograma de Actividades.	69
5.2. Revisión del estado del arte.	69
5.3. Ejercicio de Aplicación PPP.	73
5.4. Procesamiento diferencial de datos GNSS.	74
5.4.1. Configuración del espacio de trabajo en el TBC.	75
5.4.2. Importar ficheros.	77
5.4.3. Procesar la red GNSS.	80
5.4.4. Cálculo y ajuste de la red GNSS.	81
5.5. Procesamiento absoluto de datos GNSS.	83
5.5.1. Procesamiento PPP utilizando servicios en línea.	84
5.5.2. Procesamiento PPP utilizando Software.	85
6. Resultados.	88
6.1. Resultados parciales.	88
6.2. Resultados finales.	90
6.3. Análisis de resultados.	95
7. Conclusiones.	98
7.1. Desarrollos Futuros.	99
Bibliografía.	101

A. Anexo I: Informe del procesamiento Diferencial con TBC.	104
B. Anexo II: Informe del procesamiento PPP.	105

Índice de figuras

Figura	Página
1.1. Métodos de posicionamiento con GNSS. Fuente: Tomado de Berné et al. (2014)	13
3.1. Principio de posicionamiento en espacio bidimensional. Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)	19
3.2. Principio de posicionamiento en espacio bidimensional con deriva en el reloj del receptor. Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)	20
3.3. Señal de pseudodistancia. Fuente: Elaboración propia.	21
3.4. Sincronización de la señal. Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)	22
3.5. Medida de fase. Fuente: Elaboración propia.	24
3.6. Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera. Fuente: Elaboración propia.	29
3.7. Capa de la Troposfera. Fuente: Elaboración propia.	29
3.8. Capa de la Ionosfera. Fuente: Elaboración propia.	31
3.9. Error multipath. Fuente: Elaboración propia.	33
3.10. Centro de fase de la antena del satélite y Offset Fuente: Tomado de (Valero et al., 2019)	34
3.11. Receptor permanente que muestra ARP y APC. Fuente: Tomado de (Subirana et al., 2013)	35
3.12. Efecto Wind-Up. Fuente: Tomado de (Capilla Romá, 2015)	36
3.13. Posicionamiento Absoluto. Fuente: Elaboración propia.	37
3.14. Posicionamiento Diferencial o relativo. Fuente: Elaboración propia.	38
4.1. Licencia de Trimble Business Center (TBC). Fuente: Tomado de TBC	48
4.2. Técnicas de posicionamiento PPP. Fuente: Elaboración propia.	49
4.3. Servicios PPP para procesamiento Online. Fuente: Elaboración propia.	50
4.4. Formulario del servicio PPP online APPS. Tomado de (Canada., 2014)	51
4.5. Formulario del servicio PPP online PPP CSRS. Fuente: Tomado de (Canada., 2014)	52
4.6. Formulario del servicio PPP online GAPS. Fuente: Tomado de (GAPS, 2019)	54
4.7. Formulario del servicio PPP online IBGE. Fuente: Tomado de (IBGE-PPP, 2019)	55
4.8. Formulario del servicio PPP online Trimble RTX. Fuente: Tomado de (Trimble, 2019)	56
4.9. Formulario del servicio PPP online OPUS. Fuente: Tomado de (NGS, 2019)	57
4.10. Formulario del servicio PPP online AUSPOS. Fuente: Tomado de (Geoscience Australia, 2019)	58

4.11. Formulario del servicio PPP online GEOLan. Fuente: Tomado de (GEO-Lan Donosti, 2002)	59
4.12. Software para posprocesos PPP Offline Fuente: Elaboración propia.	60
5.1. Diagrama de flujo de la metodología seguida en el TFM. Fuente: Elaboración propia.	68
5.2. Cronograma de Actividades. Fuente: Elaboración propia.	69
5.3. Consulta No1 en Web of Science. Fuente: Elaboración propia.	71
5.4. Consulta No2 en Web of Science. Fuente: Elaboración propia.	71
5.5. Consulta No3 en Web of Science. Fuente: Elaboración propia.	72
5.6. Diagrama de flujo para el procesamiento diferencial. Fuente: Elaboración propia.	74
5.7. Estaciones CORS utilizadas y diseño de red. Fuente: Elaboración propia.	75
5.8. Configuración del espacio de trabajo en el TBC. Fuente: Elaboración propia.	76
5.9. Dirección para la descarga del ficheros RINEX. Fuente: Tomado de IGAC.	77
5.10. Descarga del ficheros RINEX dia juliano 184. Fuente: Tomado de IGAC.	77
5.11. Descarga del ficheros ANTEX. Fuente: Tomado de (National Geodetic Survey, 2019)	78
5.12. Página de Internet para descargar efemérides precisas. Fuente: Tomado de (International GNSS Service (IGS), 2019)	79
5.13. Diseño de la red GNSS. Fuente: Elaboración propia.	80
5.14. Edicion de sesiones de la red GNSS. Fuente: Elaboración propia. Adaptado de TBC	81
5.15. Resultado de procesamiento de los vectores. Elaboración propia	81
5.16. Coordenadas SIRGAS para la semana GPS 2061. Fuente: Tomado de (SIRGAS, 2019)	82
5.17. Coordenadas de BOGT obtenidas mediante el procesamiento diferencial. Fuente: Elaboración propia.	82
5.18. Diagrama de flujo para el procesamiento absoluto con servicios en línea. Fuente: Elaboración propia.	83
5.19. Esquema PPP para procesamiento por medio de servicios en línea. Fuente: Tomado de (IBGE-PPP, 2019)	84
5.20. Diagrama de flujo para el procesamiento absoluto con software. Fuente: Elaboración propia.	85
5.21. Archivos de entrada en el programa RTKLIB para posprocesado PPP Fuente: Elaboración propia.	86
5.22. Configuración del software RTKLIB para posprocesado PPP Fuente: Elaboración propia.	86
5.23. Configuración del software gLAB para posprocesado PPP Fuente: Elaboración propia.	87
6.1. Curva de distribución normal Fuente: Tomado de (Wolf, P, Ghilani, 2016)	94
6.2. Valores de coordenadas X Fuente: Elaboración propia.	96
6.3. Valores de coordenadas Y Fuente: Elaboración propia.	96
6.4. Valores de coordenadas Z Fuente: Elaboración propia.	97

Índice de tablas

Tabla	Página
3.1. Numero de satélites y frecuencia de las constelaciones GNSS. Fuente: Elaboración propia.	18
3.2. Errores en el posicionamiento GNSS Fuente: Tomado de (Valero et al., 2019)	26
5.1. Lista de palabras claves Fuente: Elaboración propia.	70
5.2. Coordenadas Geocéntricas de las estaciones CORS de apoyo. Fuente: Elaboración propia.	82
6.1. Coordenadas de BOGT certificadas certificadas por SIRGAS Fuente: Elaboración propia.	88
6.2. Coordenadas de BOGT calculadas por el TBC Fuente: Elaboración propia.	88
6.3. Resultados de los servicios PPP utilizados. Fuente: Elaboración propia.	89
6.4. Coordenadas de BOGT calculadas por servicios PPP. Fuente: Elaboración propia.	90
6.5. Coordenadas de BOGT calculadas por software académico. Fuente: Elaboración propia.	90
6.6. Coordenadas finales de todos los procesos realizados para BOGT Fuente: Elaboración propia.	91
6.7. Diferencia de coordenadas entre SIRGAS y posproceso de BOGT Fuente: Elaboración propia.	91
6.8. Cálculo error residual de la Coordenadas (X) Fuente: Elaboración propia.	92
6.9. Cálculo error residual de la Coordenadas (Y) Elaboración propia	92
6.10. Cálculo error residual de la Coordenadas (Z) Fuente: Elaboración propia.	93
6.11. Desviación estándar utilizando todos los procesamientos absoluto y diferencial. Fuente: Elaboración propia.	93
6.12. Calculo del error probable de la coordenada (X) Fuente: Elaboración propia.	94
6.13. Calculo del error probable de la coordenada (Y) Fuente: Elaboración propia.	95
6.14. Calculo del error probable de la coordenada (Z) Fuente: Elaboración propia.	95
6.15. Desviación estándar utilizando todos los procesamientos PPP Fuente: Elaboración propia.	95
6.16. Desviación estándar del procesamiento utilizando los servicio PPP en línea. Fuente: Elaboración propia.	95
6.17. Desviación estándar del procesamiento utilizando los software PPP Fuente: Elaboración propia.	96
6.18. Promedio de las diferencias de coordenadas Fuente: Realización propia.	97

Resumen

El posicionamiento puntual preciso (PPP) permite la determinación de la posición de un punto con un único receptor GNSS (Global Navigation Satellite System), mejorando la precisión de la medida sin necesidad de recurrir a técnicas de posicionamiento diferenciales. Para ello, utiliza los observables de código y fase, en doble frecuencia, datos de órbitas precisas y datos del reloj del satélite, como los que proporciona el IGS (International GNSS Service). El TFM desarrollado, en el Master en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, tiene como propósito, comprender PPP, analizar sus ventajas e inconvenientes y describir algunas de sus aplicaciones. Para ello, es necesario contrastar los modelos matemáticos utilizados en esta técnica, examinar sus aplicaciones y evaluar las precisiones alcanzadas en las mismas. De la misma manera se realiza una comparación de la precisión obtenida mediante PPP y diferentes técnicas diferenciales. Una vez, se definieron los conceptos y modelos matemáticos de PPP, se realizó la exploración y descripción de las herramientas informáticas utilizadas en el procesamiento de datos GNSS bajo la técnica PPP. Lo que dio como resultado, la implementación de doce herramientas informáticas, clasificadas entre software comercial, científico, académico y servicios en línea. Por último, se encuentran los resultados, análisis y comparación de coordenadas finales procesadas. Se puede concluir que PPP ofrece una alternativa interesante frente a la forma tradicional del posicionamiento diferencial, ya que permite procesar datos de modo estático, cinemático y en tiempo real, esta técnica se ha consolidado, como una metodología para densificar redes geodésicas de primer orden.

Lista de acrónimos

AG AutoGIPSY

APC Antenna Phase Centre

APPS Automatic Precise Positioning Service

ARP Antenna Reference Point

AUSPOS GPS data processing service provided by Geoscience Australia

BDS BeiDou Navigation Satellite System

CORS Estación de Referencia de Operación Continua

CSRS-PPP Canadian Spatial Reference System PPP

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DoD Departamento de Defensa de los Estados Unidos

DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service

GALILEO Sistema de Navegación por Satélite Europeo

GAPS GNSS Analysis and positioning software

GDGPS Global Differential GPS

GLONASS Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

GNSS Global Navigation Satellite System

GOC GDGPS Operation Centers

GPS Global Positioning System

GSOC German Space Operations Center

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service

IFB Interfrequency Bias

IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IGS International GNSS Service
IGS-RTPP IGS Real Time Pilot Project
INS Inertial Navigation System
IRNSS Indian Regional Navigation Satellite System
ISB Inter System Bias
ITRF International Terrestrial Reference Frame
JPL Jet Propulsion Laboratory de la NASA
LEO Low Earth Orbit
MAGNA Marco Geocéntrico Nacional de Referencia
MSAS Multi-Functional Satellite Augmentation System
NAVSTAR Navigation Satellite Timing and Ranging
NRCan Natural Resources Canada
NTRIP Networked Transport of RTCM vía Internet Protocol
OPUS Online Positioning User Service
PPP Precise Point Positioning
QZSS Quazi Zenith Satellite Systems
RETICLE Real-Time System for Clock Estimation
RINEX Receiver INdependent EXchange
RTCM Radio Technical Comission for Maritime Services
RTG Real Time GIPSY
RTK Real Time Kinematic
RTPP Real Time Pilot Project
SDCM System for Differential Corrections and Monitoring
SIRGAS Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SLR Satellite Laser Ranging
TAI Tiempo Atómico Internacional
TBC Trimble Business Center
TFM Trabajo Fin de Máster
UPD Uncalibrated Phase Delay
VLBI Very Long Baseline Interferometry
WAAS Wide Area Augmentation System

Capítulo 1

Introducción.

Actualmente bajo el acrónimo de Global Navigation Satellite System (GNSS), se acogen los sistemas globales de navegación por satélite, conformado por las siguientes constelaciones; Global Positioning System (GPS) desarrollado por los Estados Unidos, Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) de Rusia, el Sistema de Navegación por Satélite Europeo (GALILEO), BeiDou Navigation Satellite System (BDS) de China. También se deben considerar otros sistemas regionales, como Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) de la India y Quazi Zenith Satellite Systems (QZSS) de Japón, además de los sistemas de aumentación operativos Wide Area Augmentation System (WAAS), European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), Multi-Functional Satellite Augmentation System (MSAS), y System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM), y otros en desarrollo. Estas constelaciones transmiten señales en el espacio, las cuales son captadas a partir de los receptores GNSS y permiten determinar la ubicación de elementos sobre la superficie terrestre. Para ello se utilizan distintos métodos de observación y posicionamiento, que según lo expuesto por (Berné et al., 2014), se pueden clasificar como se observa en la figura (1.1), en técnicas de posicionamiento relativas o absolutas.

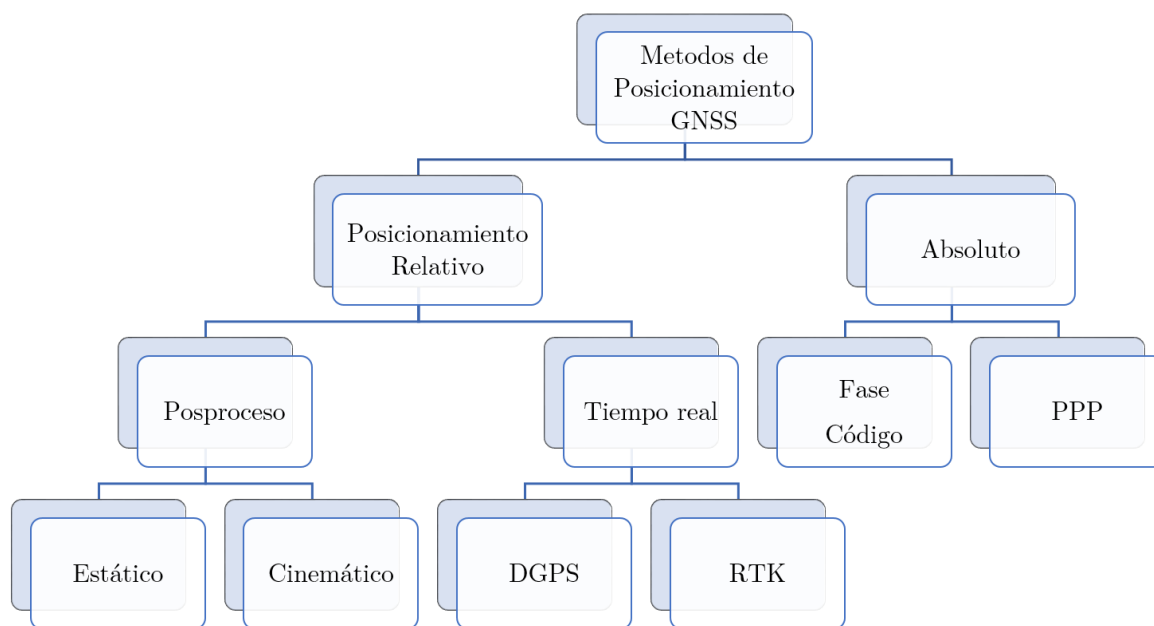


Figura 1.1: Métodos de posicionamiento con GNSS.

Fuente: Tomado de Berné et al. (2014)

Teniendo en cuenta la clasificación mencionada en la figura (1.1), se ha tomado como objeto de estudio la técnica denominada Precise Point Positioning (PPP), la cual esta enmarcada dentro del posicionamiento absoluto. Por lo tanto, este Trabajo Fin de Máster (TFM), consiste en definir el concepto general de PPP, describir los modelos matemáticos utilizados, explicar algunas aplicaciones y las precisiones alcanzadas, realizar una comparación con la técnica tradicional diferencial, y por último analizar sus ventajas y desventajas.

1.1. Estado del arte.

Es esta sección se discute el estado del arte, de la técnica de posicionamiento absoluto PPP, con esto en mente se quiere, investigar y documentar la forma en que diferentes autores han tratado los conceptos fundamentales tanto teóricos, como matemáticos de PPP, también se quiere consultar los inicios, desarrollo y futuras tendencias de PPP.

La disponibilidad de los sistemas de posicionamiento global, para el uso privado inició en 1995, con la introducción de Navigation Satellite Timing and Ranging (NAVSTAR) y GLONASS. Estos sistemas se han consolidado en el mercado de la navegación, la georreferenciación y del posicionamiento, gracias entre otras a la variedad de aplicaciones que ofrece, siendo de esta manera el sector de la Geomática uno de sus mayores exponentes con mayor potencial, debido a que utiliza los sistemas GNSS para la determinar con precisión las coordenadas de un punto sobre la superficie terrestre. En la opinión de (Héroux and Kouba, 2001), quienes afirman que esto ha llevado a que muchos usuarios interesados en el posicionamiento geodésico hayan adoptado las órbitas precisas del International GNSS Service (IGS), para lograr una precisión a nivel de centímetro. De acuerdo a lo anterior, y sabiendo que, en nuestra actividad para determinar las coordenadas de un usuario, se utiliza en la actualidad el posicionamiento diferencial, el cual requiere la combinación de observaciones de un mínimo de dos receptores GNSS con al menos uno ocupando una estación con coordenadas conocidas. La posición del usuario se puede estimar en relación con una o múltiples estaciones de referencia utilizando observaciones de fase portadora y un enfoque de estimación de línea base, estas observaciones son una forma de corregir los errores de los satélites GNSS y el reloj del receptor, para ello se realiza un modo procesamiento, que ha demostrado ser muy eficiente. Sin embargo, el inconveniente es que requiere que se realicen observaciones simultáneas en las estaciones de referencia, con la restricción práctica que esto implica.

Por otro lado, y con el objetivo de ofrecer una alternativa al sistema de posicionamiento diferencial, en 1997 (Zumberge et al., 1997), introduce el concepto de PPP, técnica de posicionamiento absoluto que utiliza las observaciones de fase portadora y pseudorange, que a diferencia del posicionamiento relativo no requiere observaciones simultáneas en dos o más estaciones. Teniendo en cuenta a (Kouba et al., 2017), a finales de la década de 1990, gracias en gran parte a los esfuerzos organizados del IGS, la popularidad de PPP aumento significativamente en el desarrollo de aplicaciones geodésicas, geodinámicas, meteorológicas, etc. Lo que puso en evidencia el aumento de los servicios online y de paquetes informáticos para el procesamiento de datos PPP.

Tal como lo expresa Capilla Romá (2015), *“La investigación y evolución de la técnica, constituye una gesta de gran relevancia que potencialmente hace del posicionamiento PPP con un único receptor una futura técnica competitiva frente al posicionamiento relativo entre dos receptores o entre un receptor y una red de estaciones. El logro de conseguir una alta precisión con un solo receptor es, posiblemente, tan innovador y revolucionario como la introducción del GPS en sí, y puede ser muy útil en zonas donde no se haya desarrollado una infraestructura cercana de estaciones permanentes GNSS, áreas de alta montaña, desérticas o zonas polares.”*

El modelo de observación de posicionamiento preciso de puntos (PPP) es prácticamente un modelo estándar hoy en día (aquí estamos usando la palabra (estándar) porque la mayoría de los paquetes informáticos PPP, (Leandro et al., 2006b) usan este modelo, con una combinación libre de ionosfera de pseudorange y fase portadora. Sin embargo se pueden encontrar algunas diferencias entre ellos, como el proceso de estimación de errores.

De acuerdo con (Drewes et al., 2016), el uso de la estrategia PPP desempeña un papel clave en el desarrollo de nuevos productos porque es un método eficiente y autónomo, es sensible a los retrasos absolutos de la troposfera, puede explotar de manera óptima los datos de todas las multiconstelaciones GNSS, puede producir fácilmente una variedad completa de parámetros tales como retrasos totales cenitales, retrasos de trayectoria inclinada y también puede soportar una resolución temporal tan razonable como alta de todos los parámetros. Gracias a esto en muchas partes del mundo, se están realizando grandes esfuerzos para proporcionar soluciones GNSS reprocesadas de manera homogénea que sean la base para derivar coordenadas, velocidades y parámetros de troposfera muy precisos. De la misma forma (Drewes et al., 2016), han propuesto el desarrollo de métodos y algoritmos para la resolución de ambigüedades en PPP a partir del concepto de Multiconstelación GNSS; buscando el desarrollo de un nuevo modelo de corrección ionosférica para acelerar el tiempo de inicialización de la ambigüedad PPP.

Partiendo del avance tecnológico en los GNSS, algunos autores como (Teunissen and Khodabandeh, 2015), plantean alternativas como PPP-RTK, la cual amplía el concepto PPP al proporcionar a los usuarios de un solo receptor, junto a las órbitas y los relojes, también información sobre los sesgos de la fase de satélite. Esta información, cuando se proporciona correctamente, permite la recuperación del número entero de las ambigüedades del usuario, permitiendo así la resolución de la ambigüedad de un solo receptor, reduciendo así los tiempos de convergencia en comparación con el posicionamiento PPP tradicional.

Capítulo 2

Objetivos.

General

Comprender el Precise Point Positioning (PPP), analizar sus ventajas e inconvenientes y describir alguna de sus aplicaciones.

Específicos

1. Definir el concepto general de Precise Point Positioning (PPP)
2. Describir el modelo o modelos matemáticos utilizados en esta técnica.
3. Describir sus aplicaciones y la precisión alcanzada en las mismas.
4. Realizar una comparación de la precisión obtenida mediante Precise Point Positioning (PPP) y diferentes técnicas relativas o diferenciales.

Capítulo 3

Contexto general del trabajo.

En este capítulo, se aborda el contexto general del trabajo desarrollado, que incluye definiciones, conceptos y modelos matemáticos, necesarios para entender la técnica de posicionamiento PPP. Para ello empezaremos con la el concepto teórico de PPP, luego se abordaran los modelos matemáticos utilizado en esta técnica. Enseguida se explican los métodos de posicionamiento GNSS; Diferencial y absoluto. Por último se describen las aplicaciones, ventajas y desventajas de PPP.

3.1. Descripción de GNSS.

El concepto de GNSS es el término estándar genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de aumentación. Los inicios datan del año de 1958, después del lanzamiento de Sputnik 1, lanzado en octubre 4 de 1957 por la por la Unión Soviética, fue el primer satélite artificial de la historia en alcanzar la órbita terrestre, un mes más tarde se lanza el Sputnik 2 y luego, en 1958 el primer satélite americano Vanguard I. De esta manera, la década de los años 60 significó una gran apuesta por los sistemas de navegación y es así como en 1964 se lanzan los primeros satélites de la constelación NAVSTAR por Estados Unidos. En 1969 con la misión espacial Apolo 11, se colocan en la Luna los reflectores láser y ese mismo año se mide la primera base por Very Long Baseline Interferometry (VLBI). En los años de 1980 el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) desarrolla el GPS, como sistema de posicionamiento y navegación. Se realizan avances importantes en las técnicas VLBI y Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). En los siguientes años el desarrollo de la Geodesia Espacial centro sus esfuerzos en establecer el sistema geodésico mundial, en determinar los modelos de geopotenciales y en la medición del campo de la gravedad de la Tierra. (Berné et al., 2014).

Las constelaciones mencionadas en la introducción, están formadas por una red de entre 21 y 30 satélites, a una altura que oscila entre 19000 y 28000 kilómetros. Los satélites están ubicados a diferentes planos orbitales elípticos, los cuales van de 55 a 65 grados con respecto al plano ecuatorial terrestre. Cada satélite cuenta con un reloj u oscilador, que emite una señal de frecuencia fundamental, que genera ondas portadoras, y códigos modulados pseudoaleatorios, que emiten a la Tierra. Los receptores en Tierra reciben estas señales y luego calculan sus posiciones. Conocidas las posiciones de los satélites en el espacio, bastará con medir las distancias entre satélite y receptor para obtener la posición (x, y, z) del receptor. La pseudodistancia es la medida de la distan-

cia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de la señal, obtenida a partir del tiempo medido en la propagación de esa señal. (Berné et al., 2014)

En la tabla (3.1), se ilustran un resumen del numero de satélites y la frecuencia en (Mhz), que tiene cada una de las constelaciones que conforman el sistema GNSS. Los datos de esta tabla están actualizados al momento de realizar este documento (2019/08/10), la información se tomo acuerdo con lo expuesto por (Sanz Subirana et al., 2013) y citado por (Capilla Romá, 2015)

Constelación	Número de Satélites	Frecuencia (Mhz)
GPS	31 operativos	L1 1575.42 L2 1227.60 L5 1176.45
GLONASS	24 operativos 4 de repuesto	G1 1602.000 G2 1246.000 G3 1202.025
GALILEO	6 operativos de 30 previstos	E1 1575.420 E5 1191.795 E5a 1176.450 E5b 1207.140 E6 1278.750
BEIDOU	5 geoestacionarios 9 no geoestacionario	B1 1561.098 B2 1207.140 B3 1268.520
QZSS	3 operativos	L1 1575.420 L2 1227.600 L5 1176.450 LEX 1278.750
IRNSS	3 geoestacionarios y 4 geosíncronos	L5 1176.450 S 2492.028

Tabla 3.1: Numero de satélites y frecuencia de las constelaciones GNSS.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Componentes GNSS.

Como señala (Fernández Plazaola, 2003), los sistemas de posicionamiento y navegación por satélite GNSS están conformados por tres elementos, denominados segmentos, que son: el espacial, el de control y el de usuario. El segmento espacial lo forman el conjunto de satélites. El segmento de control, en la Tierra, se encarga del seguimiento y mantenimiento de los satélites. El segmento de usuario lo forman los equipos receptores.

El segmento espacial: Está formado por la flota de satélites. El número de satélites y las órbitas utilizadas deben estar bien elegidos. Un usuario de cualquier punto del globo debe tener visibles, en un porcentaje alto de tiempo, el mínimo número de satélites que le permiten disfrutar del servicio de posicionamiento. Para ello, se suelen utilizar entre 24 y 30 satélites, en órbitas no geoestacionarias, que se encuentran a unos 20.000 km de la superficie terrestre. (Fernández Plazaola, 2003)

El segmento de control: Formado por estaciones centrales de seguimiento que controlan los satélites. Es el encargado de controlar y corregir las órbitas de los satélites del sector espacial, así como las de sus relojes u osciladores. La información obtenida de este seguimiento es enviada a una denominada “Estación principal”, en la que se calculan las órbitas futuras de los satélites como una función del tiempo. Los cálculos realizados y las correcciones de los relojes de los satélites están introducidos en el mensaje de navegación:(Berné et al., 2014)

El segmento usuarios: Constituido por todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites y empleados para el posicionamiento, ya sea estático o cinemático, navegación o para la determinación del tiempo con precisión. (Berné et al., 2014)

3.1.2. Principio de posicionamiento por satélites.

Para determinar la posición de un receptor GNSS, solo es necesario conocer la distancia entre el receptor y los satélites que están siendo utilizados y la posición de dichos satélites. Tal como lo expresa (Gonzalo Calderón, 2017), en la figura (3.1), para un caso bidimensional, si se conoce la posición del satélite, la medida de la distancia define una circunferencia de posibles localizaciones del receptor. La intersección de dos circunferencias da lugar a dos posibles localizaciones. Con una estimación a priori de la posición del receptor u otra medida de distancia a un tercer satélite, resulta una única posición posible para el receptor.

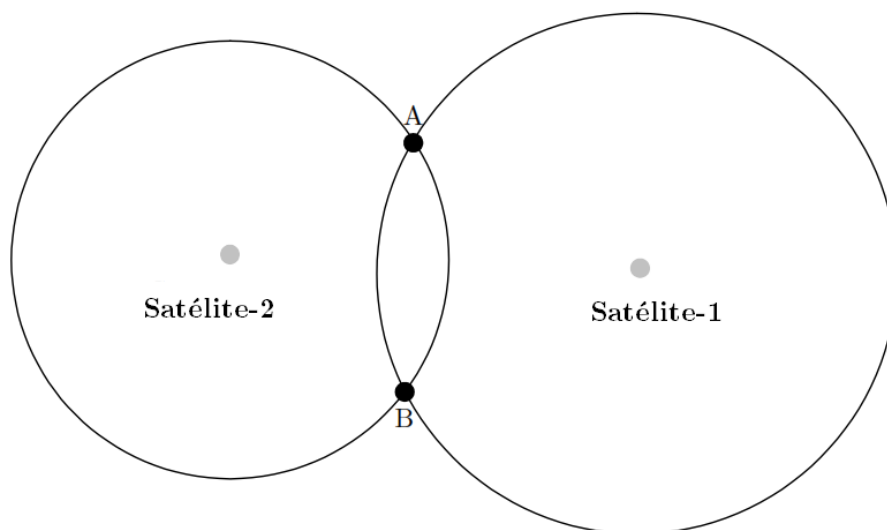


Figura 3.1: Principio de posicionamiento en espacio bidimensional.
Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)

Para el caso tridimensional es similar, y con base en lo que dice Fernández Plazaola (2003), la intersección de las dos circunferencias son los puntos A' y B', en lugar de A y B, originando un valor erróneo de la posición del receptor. Utilizando la medida de un tercer satélite se define una tercera circunferencia, resolviéndose la ambigüedad entre si era A o B y además estimándose la deriva del reloj del receptor. En el caso real, un espacio tridimensional, serán necesarias las medidas de 4 satélites para poder resolver la posición del receptor y la deriva del reloj del receptor, ver en la figura (3.2)

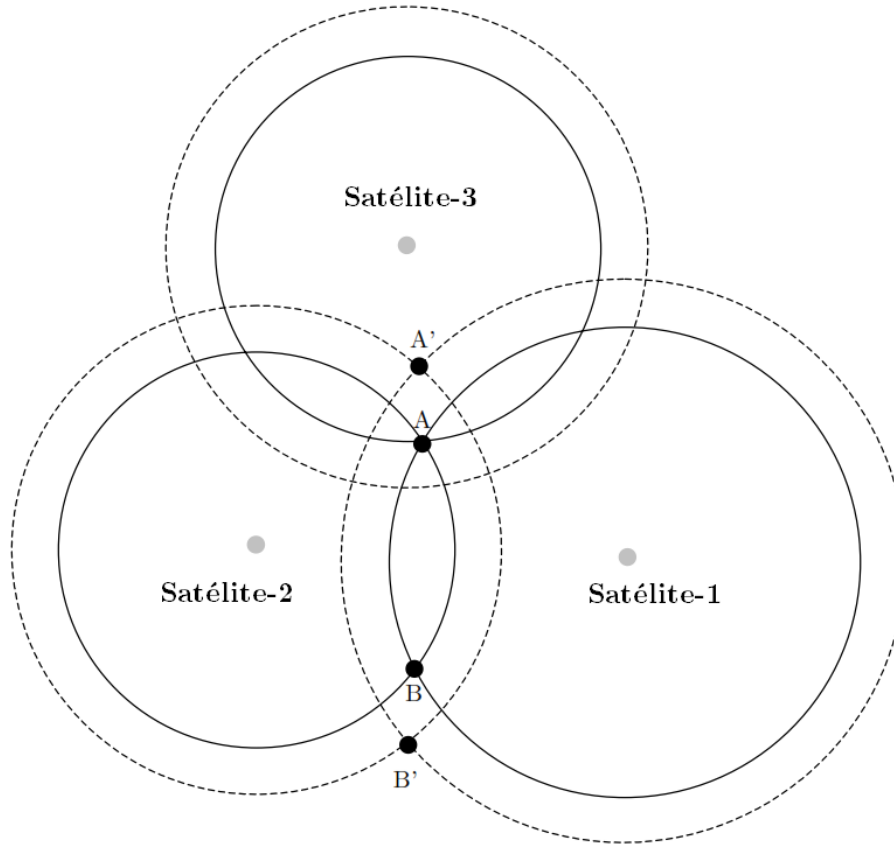


Figura 3.2: Principio de posicionamiento en espacio bidimensional con deriva en el reloj del receptor.

Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)

3.2. La señal GNSS.

Los satélites que conforman el sistema de navegación y posicionamiento, cuentan con relojes u osciladores. Estos son relojes atómicos de cesio, rubidio y en algunos casos de hidrógeno. Dichos relojes generan ondas, denominadas portadoras y sobre ellas se apoya toda la información. Los relojes atómicos mantienen una escala de tiempo estable y continua, utilizan el patrón del tiempo asociado al Tiempo Atómico Internacional (TAI). Por otro lado, los receptores GNSS, utilizan osciladores de cuarzo.

3.3. Observables.

El concepto de observables en navegación por satélite, hace referencia a los rangos que se deducen del tiempo medido entre las señales recibidas por el receptor (instante de recepción) y las señales generadas por el satélite (instante de emisión). A diferencia de las mediciones de distancia electrónicas terrestres, la navegación por satélite utiliza el “concepto unidireccional” en el que intervienen dos relojes, uno en el satélite y el otro en el receptor. Por lo tanto, los rangos están sesgados por errores de reloj del satélite y del receptor y, en consecuencia, se denotan como pseudorangos. (Hofmann-Wellenhof et al., 2011). Tal como lo menciona (Berné et al., 2014), existen tres grupos de observables GPS:

- Observables de tiempo, que permitirán obtener las pseudodistancias a partir del código.
- Observables de diferencia de fase.
- Observable Doppler.

Las nuevas estructuras de señal para GPS, GLONASS, GALILEO y BDS permiten generar código y fase.

3.3.1. Pseudodistancia.

Según lo expuesto por (Hofmann-Wellenhof et al., 2011), y como se observa en la figura (3.3), si denotamos con t^{sat} el tiempo de emisión de la señal referido a la lectura del reloj del satélite y con t_{rec} el tiempo de recepción de la señal referente a la lectura del reloj del receptor, se pueden estimar los errores de los relojes o sesgos con respecto a un sistema de tiempo en común, para lo cual se denominan δ_t^{sat} y $\delta_{t_{rec}}$. Por otro lado, la diferencia entre las lecturas del reloj es equivalente al cambio de tiempo Δ_t , el cual sincroniza el satélite y la señal de referencia durante el procedimiento de correlación de código en el receptor, tal como se observa en la figura (3.4) y se expresa en la ecuación (3.1).

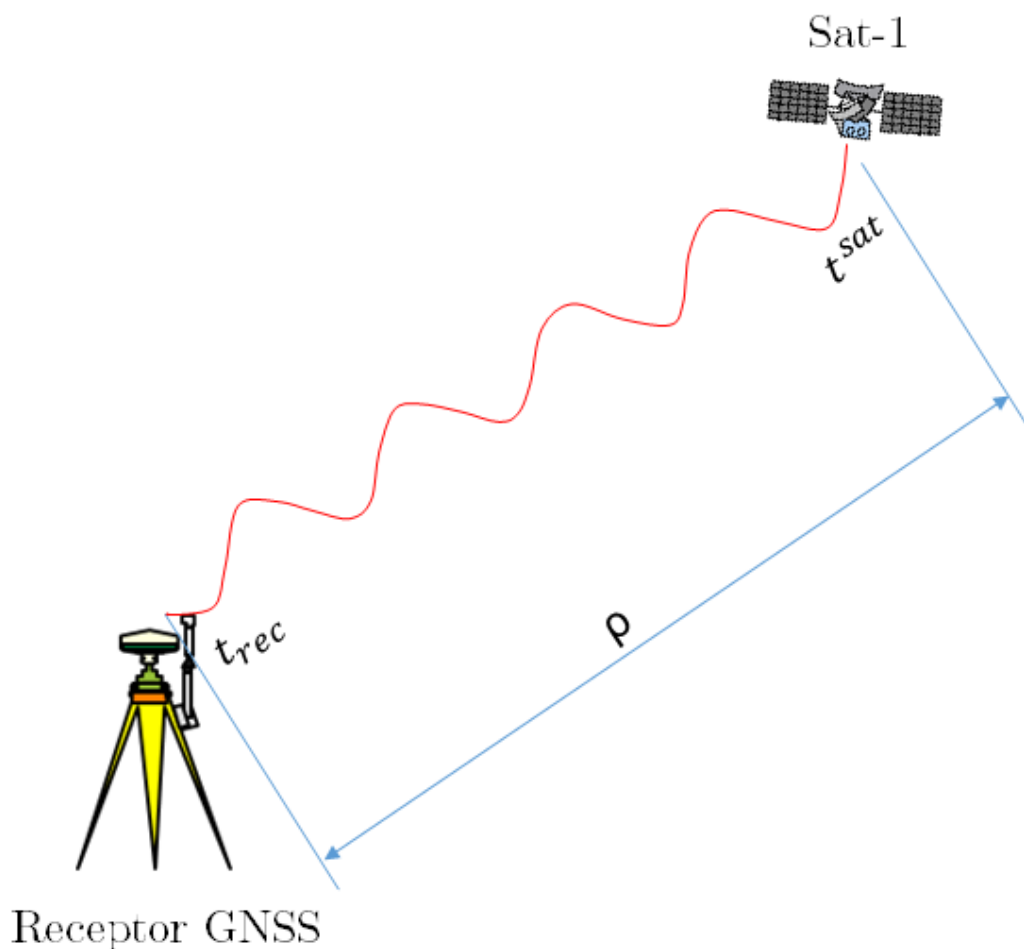


Figura 3.3: Señal de pseudodistancia.

Fuente: Elaboración propia.

$$t_{rec} - t^{sat} = [t_{rec} + \delta_{rec}] - [t^{sat} + \delta^{sat}] = \Delta t + \Delta \delta \quad (3.1)$$

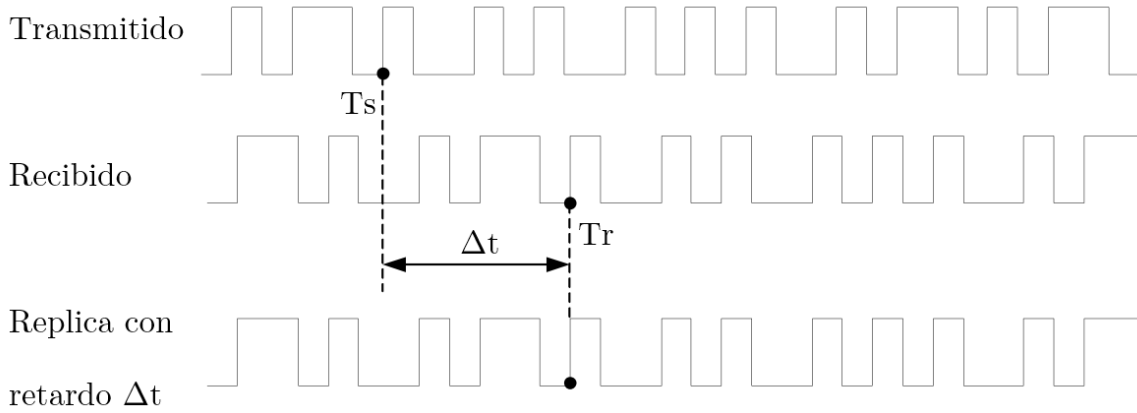


Figura 3.4: Sincronización de la señal.
Fuente: Tomado de (Fernández Plazaola, 2003)

Ahora, según lo indicando por (Hofmann-Wellenhof et al., 2011), en la ecuación (3.1), t_{rec} y t^{sat} están involucrados dos sistemas de tiempo diferentes pero que ahora en el lado derecho de esta ecuación t_{rec} y t^{sat} se refieren al tiempo común del sistema y donde $\Delta t = t_{rec} - t^{sat}$ y $\Delta \delta = \delta_{rec} - \delta^{sat}$. El sesgo δ^{sat} del reloj satelital se puede modelar si la información respectiva se transmite en consecuencia mediante un polinomio con los coeficientes que se transmiten en el mensaje de navegación. De tal manera que al multiplicar el intervalo de tiempo de la expresión $t_{rec} - t^{sat}$ de la ecuación (3.1) que se ve afectado por los errores del reloj y por la velocidad de la luz c , la expresión de pseudodistancia de código queda expresado en la ecuación (3.2).

$$R = c [t_{rec} - t^{sat}] = c\Delta t + c\Delta \delta = \rho + c\Delta \delta \quad (3.2)$$

De otra parte como indica (Valero et al., 2019), en la practica, los relojes no están sincronizados entre sí, tanto el reloj del receptor como el reloj del satélite tienen una deriva con respecto al tiempo del sistema y que junto con otros errores, hacen que no sea posible calcular con precisión las distancia, de esta manera se calcula por defecto la pseudodistancia o medida de código. La cual en otras palabras corresponde a la distancia entre la época t^{sat} del satélite y la posición de la antena el receptor en la época t_{rec} . Sin embargo la realidad no se limita solo a esto, ya que además de los problemas mencionados, existen varios errores que distorsionan la señal al atravesar la atmósfera, como los efectos relativistas, retardos, error multicamino y otros de menor importancia, que producen perturbaciones que retrasan la señal. Por lo tanto, la pseudodistancia queda expresa como se observa en la ecuación (3.3).

$$R_i = \rho + c(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + \Delta^{tropo} + \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_i + \Delta_a^{sat} + \Delta_a^{rec} \quad (3.3)$$

Donde:

- R_i = pseudodistancia.
- ρ = es la distancia geométrica entre el satélite y el centro de fase de la antena (APC) del receptor en la época de transmisión y recepción respectivamente.

- c = velocidad de la luz.
- δt_{rec} = es el estado del reloj receptor.
- δt^{sat} = es el estado de reloj del satélite.
- Δ^{tropo} = es el retardo en la señal provocado al atravesar la capa de la troposfera.
- Δ^{iono} = es el efecto ionosférico producido por el paso de la señal por la capa de la ionosfera, y dado su carácter dispersivo, el término va a depender de la frecuencia.
- Δ_m = son los errores debidos al efecto multicamino (multipath) del observable código.
- ε_i = errores debidos a efectos no modelados que contribuyen al ruido de la observación.
- Δ_a^{sat} = corrección centro antena satélite
- Δ_a^{rec} = corrección antena receptor.

3.3.2. Medidas de fase.

Según lo expuesto por (Fernández Plazaola, 2003), se afirma que la sincronización entre la portadora de la señal recibida y la replica generada en recepción permite obtener una medida de la fase de la portadora. Esta medida de fase puede ser utilizada también para estimar la distancia satélite y receptor. Por lo tanto, la medida de distancia puede calcularse midiendo el número entero N de longitudes de onda λ y la parte no entera φ , como se observa en la ecuación (3.4) y en la figura (3.5).

$$D = \lambda(N + \varphi) \quad (3.4)$$

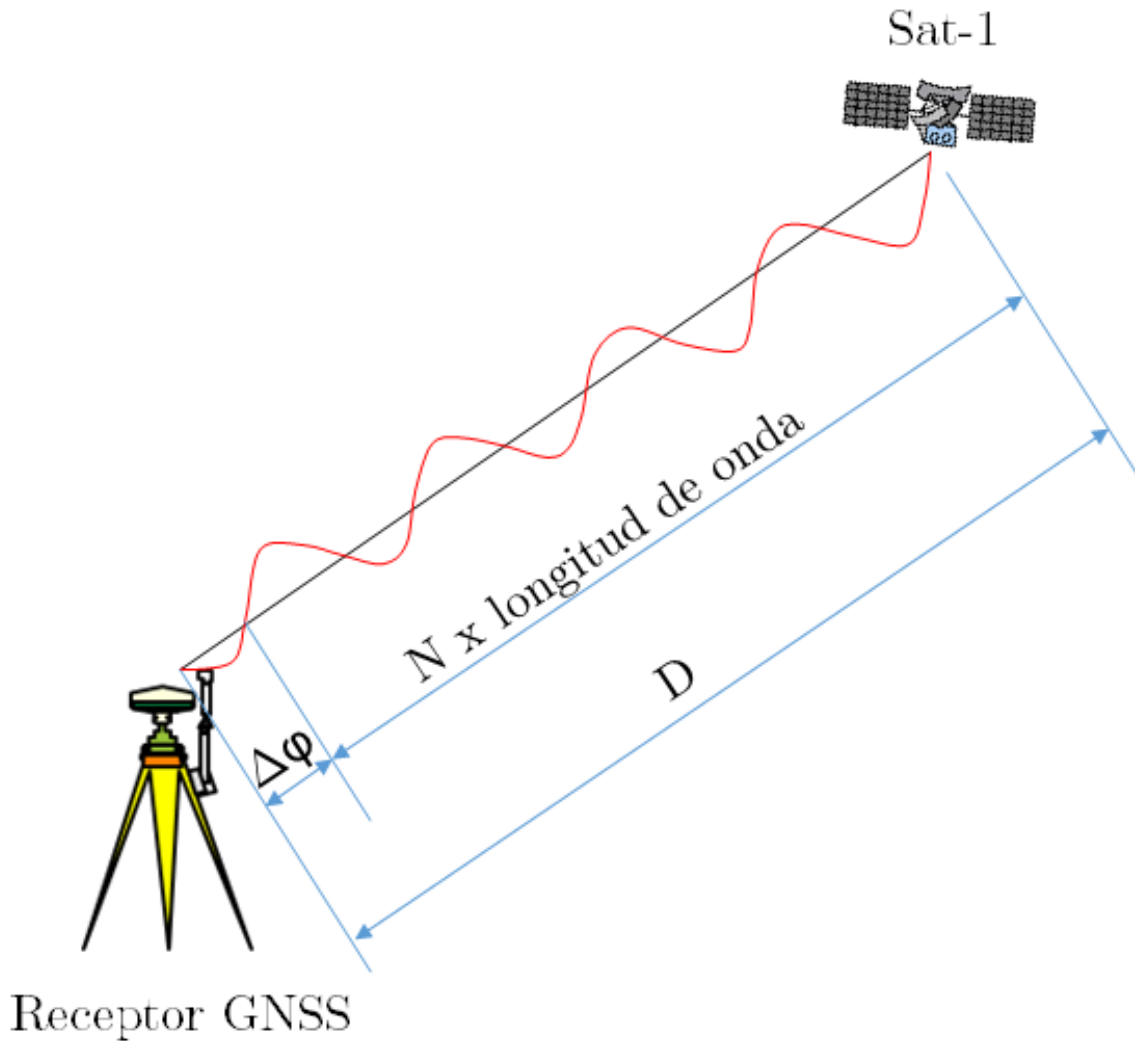


Figura 3.5: Medida de fase.
Fuente: Elaboración propia.

Esta idea tan sencilla no es fácil de llevar a cabo dada la dificultad de determinar N , y a este problema se le llama la determinación de ambigüedades. La medida de la fase se suele expresar en ciclos de portadora. De manera que esta distancia será igual al número entero de ciclos de portadora N transcurridos desde que la señal salió del satélite hasta que llega al receptor, más la fracción de ciclo medida. El observable de fase es la diferencia entre la fase de la portadora recibida del satélite y la fase generada internamente por el oscilador del receptor. Estas medidas de fase se registran en

intervalos iguales de tiempos del receptor, y no tienen en cuenta el número de ondas que hay entre el receptor y el satélite, pero las variaciones del observable de fase con el tiempo están correlacionadas con los cambios en la distancia topocéntrica (Berné et al., 2014).

De forma abreviada, la ecuación general del observable de fase se puede expresar de la siguiente manera, ver ecuación (3.5). (Valero et al., 2019)

$$\Phi = \rho + c\Delta\delta + \lambda N + \Delta^{tropo} - \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_i \quad (3.5)$$

El número de ciclos entre satélite y receptor depende de la fase generada por los osciladores. Al igual que en pseudodistancia, existen los errores de relojes, y también en su recorrido sufre los efectos de retraso o adelanto de señal al atravesar la atmósfera, y otros errores como multicamino. Por lo tanto, en la ecuación (3.6), se observa la expresión general en unidades lineales:

$$\Phi_i = \rho + c(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + \lambda N + \Delta^{tropo} - \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_i + \lambda_i \omega + \Delta_{cf}^{sat} + \Delta_{cf}^{rec} + \lambda_{\Phi}^{sat} + \lambda_{\Phi}^{rec} \quad (3.6)$$

Donde:

- ρ = es la distancia geométrica entre el satélite y el centro de fase de la antena (APC) del receptor en la época de transmisión y recepción respectivamente.
- c = velocidad de la luz.
- δt_{rec} = es el estado del reloj receptor.
- δt^{sat} = es el estado de reloj del satélite.
- λN = representa a la ambigüedad
- Δ^{tropo} = es el retardo en la señal provocado al atravesar la capa de la troposfera.
- Δ^{iono} = es el efecto ionosférico producido por el paso de la señal por la capa de la ionosfera, y dado su carácter dispersivo, el término va a depender de la frecuencia.
- Δ_m = son los errores debidos al efecto multicamino (multipath) del observable código.
- ε_i = errores debidos a efectos no modelados que contribuyen al ruido de la observación.
- $\lambda_i \omega$ = efecto windup de polarización circular de la señal electromagnética con $\lambda_i = \frac{c}{f}$
- Δ_{cf}^{sat} = corrección centro de fase antena satélite.
- Δ_{cf}^{rec} = corrección centro de fase antena receptor.
- λ_{Φ}^{sat} = bias de fase en satélite.
- λ_{Φ}^{rec} = bias de fase en receptor.

Finalmente, en la ecuación (3.7), se expresa en unidades de ciclo:

$$\Phi = \frac{\rho}{\lambda} + \frac{(c\Delta\delta)}{\lambda} + N + \frac{\Delta^{tropo}}{\lambda} - \frac{\Delta^{iono}}{\lambda} + \Delta_m + \varepsilon_p \quad (3.7)$$

3.4. Fuentes de error GNSS.

De acuerdo con los autores (Berné et al., 2014) y (Capilla Romá, 2015), la propagación de la señal y el propio sistema GNSS, tanto en pseudodistancia como en las diferencias de fase, se ven afectados por errores sistemáticos y por errores aleatorios, algunas producidas por causas técnicas y otras por causas naturales. De acuerdo con lo anterior se pueden clasificar esos errores según su procedencia en tres grupos, errores asociados al satélite, con el medio de propagación y con el receptor, estos errores se muestran en la tabla 3.2. También se indican otros errores intencionados y ajenos al sistema propiamente dicho, pero que afectan a la señal, o errores que afectan a la posición del receptor.

Sistema GNSS	Fuentes de error y tipo de efectos
Satélite	Errores orbitales
	Oscilador. Offset del reloj
	Efectos relativistas
	Errores intencionados por el administrador del sistema
Propagación	Efectos atmosféricos
	Refracción ionosférica
	Refracción troposférica
	Pérdidas de ciclo
Receptor	Variación del centro fase
	Oscilador. Offset del reloj
	Multipath
	Retardos instrumentales
Errores intencionados con dispositivos externos que perturban la señal	Jamming
	Meaconing
	Spoofing
	Interferencias electromagnéticas
Variaciones en la posición del receptor	Mareas terrestres
	Cargas oceánicas y atmósfera
	Movimientos tectónicos

Tabla 3.2: Errores en el posicionamiento GNSS

Fuente: Tomado de (Valero et al., 2019)

3.5. Descripción de modelos matemáticos utilizados en PPP.

Como se menciono anteriormente, la señal del GNSS y la distancia real entre el satélite y el receptor, se expresan mediante la ecuación (3.3). En ella se mencionan los errores que sufre la señal en su recorrido y que son el eje fundamental a modelar en la técnica PPP. Por esta razón, en esta sección se describen los términos a modelar en las observaciones, agrupando los diferentes efectos de acuerdo a su naturaleza y características.

3.5.1. Error en los relojes en GNSS.

Autores como Capilla Romá (2015) y Hofmann-Wellenhof et al. (2011), sostienen que cuando se hablan de relojes es necesario diferenciar entre los relojes de los satélites GNSS y los relojes del receptor.

Relojes de los satélites GNSS: La fuente de la frecuencia fundamental es controlada por los relojes atómicos de los satélites por lo que es de gran importancia controlar su estabilidad, cabe anotar que en los últimos años se han desarrollado mejores modelos en cuanto al comportamiento y deriva de los osciladores lo cual permite obtener mejores correcciones de dichos relojes. Es necesario precisar que en la técnica de estudio PPP, el vector de estado para la estimación de los relojes debe ser obtenida de una fuente externa para obtener precisiones que sean inferiores al decímetro además es importante que las correcciones de reloj de los satélites correspondan a la misma escala de tiempo y que concuerde con la mezcla de señales definida para el cálculo de la posición

Reloj del receptor: Los Offset de estado, afectan la medida de la distancia; la estimación del reloj del receptor se realiza juntamente con las coordenadas del receptor.

A continuación en la ecuación (3.8), se presente el modelo de dichos Offset mediante la siguiente expresión:

$$(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) c \quad (3.8)$$

Donde:

- δt_{rec} = es el estado del reloj receptor.
- δt^{sat} = es el estado de reloj del satélite.
- c = velocidad de la luz.

3.5.2. Determinación de la órbita precisa.

Es uno de componentes fundamentales en posicionamiento GNSS, y según lo explica Hofmann-Wellenhof et al. (2011), se define de la siguiente manera:

Órbita precisa Teórica: La posición del satélite se obtiene del mensaje de navegación transmitido por el mismo satélite, teniendo en cuenta esto cada constelación describe detalladamente las formulas en sus respectivos documentos de control de interfaces y especificación de interfaces. De manera habitual para determinar la posición de un satélite que gira alrededor de la Tierra son necesarios seis parámetros, los cuales definen el movimiento Kepleriano:

- ω = Argumento del perigeo.
- Ω = Ascensión recta del nodo ascendente
- I = Inclinación del plano orbital
- a = Semieje mayor de la órbita elíptica

- e = Excentricidad de la elipse
- T_0 = Época de paso por el perigeo

Los datos de las efemérides son basados en información de las estaciones que forman el segmento control de cada constelación, normalmente se utilizan los datos más recientes los cuales no deberán superar un periodo de cuatro horas, así con estas efemérides las cuales contienen los parámetros descritos anteriormente es posible obtener la elipse de Kepler en una época de referencia. Es importante precisar que al ser una órbita teórica la precisión será del decímetro.

Órbita precisa teniendo en cuenta las perturbaciones del satélite: Para este cálculo se tienen en cuenta las distorsiones reales como la aceleración del satélite, lo cual genera algunas variaciones en los parámetros orbitales, para esto serán necesarios los productos orbitales precisos los cuales se obtienen de los centros de análisis o del IGS. El uso de estos productos permitirá obtener datos de mayor precisión (alrededor del milímetro o centímetro), por tanto, son indispensables en el posicionamiento PPP. En la ecuación (3.9), se expresa la determinación del movimiento del satélite según lo indica (Capilla Romá, 2015).

$$\vec{X}_{gcrs}^{sat} = -GM_E \frac{\vec{x}_{gcrs}^{sat}}{|\vec{x}_{gcrs}^{sat}|^3} + \vec{a} \left(t^t, \vec{X}_{gcrs}^{sat}, \dot{\vec{X}}_{gcrs}^{sat}, q_1, q_2, \dots \dots \dots q_n \right) \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9), se puede dividir en dos términos: las fuerzas gravitatorias en función de la constante de gravitación y la masa de la tierra, GM_E , y la aceleración perturbadora total del término a , siendo esta aceleración perturbadora función de:

- t^t = tiempo de transmisión
- \vec{x}_{gcrs}^{sat} = la posición del centro de masas del satélite
- $\dot{\vec{X}}_{gcrs}^{sat}$ = la velocidad del centro de masas del satélite y $q_1 \dots q_n$ los parámetros dinámicos orbitales

Los factores que generan las distorsiones de la aceleración de los satélites pueden ser de dos tipos; de origen gravitacional como “la no esfericidad del campo de gravedad de la tierra, las fuerzas gravitacionales de otros cuerpos, la luna, el sol o el efecto de las mareas, entre otros”, y los de origen no gravitacional como “la presión de radiación solar, el rozamiento del aire, los efectos relativistas y otros como el viento solar o las tormentas geomagnéticas”.(Capilla Romá, 2015).

3.5.3. Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera.

La trayectoria de la señal GNSS desde el satélite hasta el receptor GNSS atraviesa la atmósfera, la cual no es uniforme ya que esta formada por capas con diferentes índices de refracción (la densidad del gas y plasma atmosférico no es homogéneo), lo cual provoca variaciones espaciales y temporales (Capilla Romá, 2015). Debido a esas diferencias en el índice de refracción, los rayos tienen una trayectoria geometría extendida, con respecto a la trayectoria en un espacio libre, cuando viajan a través de la atmósfera (Subirana et al., 2013), como se observa en la figura (3.6).

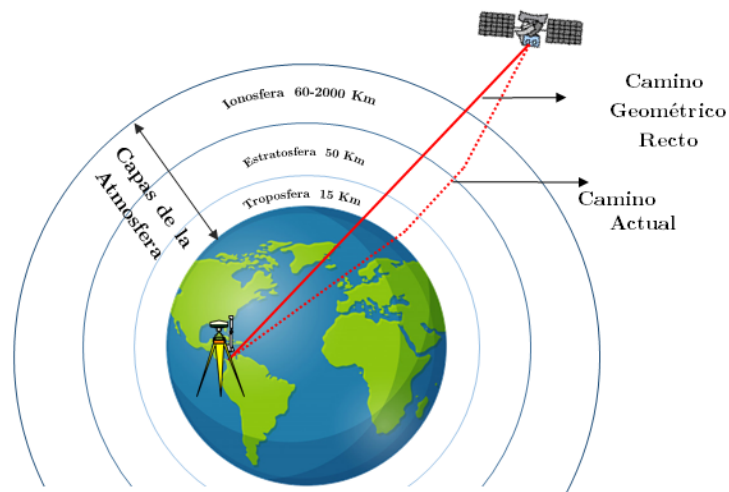


Figura 3.6: Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera.
Fuente: Elaboración propia.

Los retardos atmosféricos pueden ser causados por la troposfera o por la ionosfera, los cuales se describen brevemente a continuación:

Retardo troposférico: Corresponde a un retraso en la medición de la señal que viaja desde el satélite al receptor, producido en el momento en el cual la señal atraviesa la capa de la atmósfera conocida como troposfera (Leick et al., 2015). La troposfera se encuentra ubicada en la parte inferior de la atmósfera y tiene una longitud aproximada de 15 Km. En algunos textos como (Capilla Romá, 2015), se describe la longitud de la troposfera con una longitud de cerca de 60 Km en la cual se incluye la capa de estratosfera, tal como se detalla en Capilla y se describe en la figura (3.7):



Figura 3.7: Capa de la Troposfera.
Fuente: Elaboración propia.

La troposfera se comporta como un medio no dispersivo, es decir, la refracción es independiente de las señales que la atraviesan (Leick et al., 2015), es decir que las ondas comprendidas en la banda L las cuales son utilizadas en GNSS, presentan el mismo retraso. Ahora este depende de distintos factores como la temperatura, presión y la humedad, esto en cuanto a las condiciones atmosféricas, además del ángulo de elevación del satélite y de la ubicación del receptor. El retardo troposférico se puede escribir de acuerdo con la ecuación (3.10):

$$\Delta^{trop} = \int_{Satelite}^{Receptor} (n_t - 1) \times dS \quad (3.10)$$

Donde:

- Δ^{trop} = es el retardo troposférico expresado en m.
- n_t = corresponde al índice de refracción del medio troposférico.
- dS = denota el diferencial de arco de la trayectoria.

Tomando como N la refractividad del medio troposférico, la ecuación (3.10) puede expresarse como:

$$\Delta^{trop} = 10^{-6} \int_{Satelite}^{Receptor} N \times dS \quad (3.11)$$

La refractividad del medio troposférico N , se puede dividir en dos componentes, una componente hidrostática (seca), la cual aporta cerca del 90% de la refracción atmosférica total y su estimación es muy precisa (Leick et al., 2015), mientras que la componente hidrostática húmeda o conocida como no hidrostática es el resultado del vapor de agua, siendo esta más difícil de medir debido a las incertidumbres en la distribución atmosférica (Capilla Romá, 2015).

Como lo indica (Valero et al., 2019), el retardo hidrostático se puede calcular a partir de modelos empíricos de dos posibles formas. La primera utiliza los datos meteorológicos de superficie como es el caso de los modelos de Saastamoinen (1972) y otra es la propuesta por Hopfield (1969), para proporcionar un retraso troposférico en la dirección cenital (ZTD), luego habrá que aplicar una función de mapeo. La segunda forma utiliza el tiempo y coordenadas aproximadas para usar los parámetros promedio de los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT), por ejemplo, el modelo empírico de retraso inclinado para técnicas geodésicas de radio espacio GPT2 expuesto por (Lagler et al., 2013) y el modelo de atmósfera neutral UNB3 se encuentra documentado en (Leandro et al., 2006a).

La componente hidrostática húmeda depende el contenido del vapor de agua, el cual es muy variable, por lo que no existe un modelo bastante preciso por esta razón se estima como un parámetro desconocido. De acuerdo con (Valero et al., 2019) “Los retardos húmedos para cada señal GNSS en dirección inclinada se asignan a la dirección cenital utilizando una función de mapeo, como VMF, GMF o UNB. De esta manera, un parámetro específico de época Zenit Wet Delay (ZWD) se estima en el modelo funcional junto con otros parámetros desconocidos, incluidas las coordenadas del receptor y el error del reloj del receptor. Aunque se han desarrollado también expresiones y modelos numéricos para ello”. Existe gran cantidad de modelos troposféricos para eliminar el retardo, algunos que tienen en cuenta la inclinación de la señal o los más recientes que utilizan la función de mapeo modelo de gradientes (Valero et al., 2019).

Retardo ionosférico: El efecto ionosférico influye en la señal GNSS afectando la velocidad, dirección y polarización (Sanz Subirana et al., 2013), adicionalmente la variabilidad de la ionosfera es mayor que la troposfera por lo cual resulta más compleja su modelación (Capilla Romá, 2015).

Como lo indica (Capilla Romá, 2015), y se observa en la figura (3.8) la ionosfera es la capa de la atmósfera que comprende una región entre los 60 y los 2000Km, por encima de la estratosfera, “Contiene un medio parcialmente ionizado producido por el intercambio de moléculas de gas presentes en la atmósfera por la que se disocian en átomos que a su vez liberan electrones, dando lugar a electrones libres con cargas negativas y a iones libres con cargas positiva” (Valero et al., 2019), que afecta la propagación de las ondas de radio.

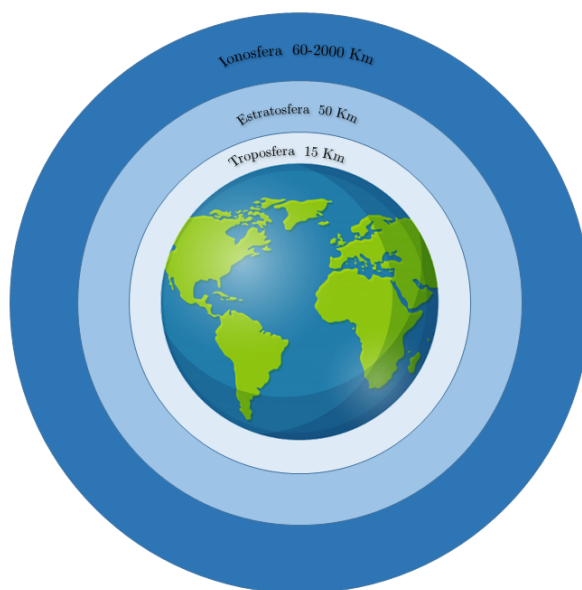


Figura 3.8: Capa de la Ionosfera.
Fuente: Elaboración propia.

Como señala (Capilla Romá, 2015), los principales efectos de la ionosfera sobre las señales GNSS son; el carácter dispersivo de la ionosfera afecta de modo diferente a las distintas portadoras y contenido de la señal GNSS, por lo cual en la medida de la fase se miden distancias más cortas, por lo que el error es negativo y en la pseudodistancia se miden distancias más largas ya que se produce un retardo en la señal.

Teniendo en cuenta a(Valero et al., 2019), el contenido total de electrones (TEC) describe el número total de electrones libres presentes dentro de una columna de base de un metro cuadrado centrada en la dirección de la observación entre dos puntos (es decir, entre el receptor y el satélite). Cuanto mayor sea la cantidad TEC, mayor será el retraso en una señal GNSS. La unidad de medida para determinar el contenido de electrones es el Total Electrón Content Unit (TECU), que se corresponde a: 1 TECU = 10¹⁶ electrones por m^2 .

Un TECU supone un retraso de 0,16 metros (0,54 ns) para la frecuencia L1 (1575,42 MHz) y de 0,26 metros para la frecuencia L2 (1227,60 MHz), o lo que es lo mismo, una cantidad de 100 TECU supone un retraso de 16 metros para la frecuencia L1 (1575,42

MHz) y de 26 metros para la frecuencia L2 (1227,60 MHz). Esta fuerte variación que presenta la ionosfera es difícil de modelar, debido a que el TEC está en función del cambio constante en la ionización solar, de la actividad magnética y del ciclo de radiación solar, dependiendo a su vez, del ángulo de elevación del satélite, de la hora del día, de la latitud a la que se encuentre el receptor y de la estación del año. Se pueden utilizar modelos ionosféricos, que establecen la distribución del TEC, pero estas concentraciones de electrones son irregulares y poco predecibles, por lo que cualquier modelo ionosférico es solo una aproximación. (Berné et al., 2014)

Como lo hace notar (Capilla Romá, 2015), de manera generalizada el TEC se puede describir mediante la ecuación (3.12):

$$TEC = \int_{Satelite}^{Receptor} n_e \, dl \quad (3.12)$$

Donde:

- n_e = es el número de electrones libres por m^3 (parámetro que varía con la altura)
- l = es el trayecto recorrido por la señal entre el satélite y el receptor.

Existen varias maneras de eliminar el efecto TEC o efecto ionosférico, y esto depende del número de frecuencias utilizadas, si se trabaja con tiempo real o en posprocesos, tal como se menciona a modo general a continuación:

Combinación de dos frecuencias L1 y L2: Con la cual puede corregirse hasta un 99.9% (Valero et al., 2019), ya que, si se utilizan las dos frecuencias y como el retardo depende de la longitud de onda, este será diferente para cada frecuencia con lo cual se podrá obtener el diferencial. El error ionosférico para la frecuencia L1 queda expresado de la siguiente ecuación (3.13):

$$\Delta S_{L1} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)(\rho_{L1} - \rho_{L2})} \quad (3.13)$$

Y la diferencia de longitud para la frecuencia L2 queda determinada mediante la ecuación (3.13):

$$\Delta S_{L1} \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 \quad (3.14)$$

Por último, como señala (Sanz Subirana et al., 2013), en el caso de los receptores de una sola frecuencia L1, las combinaciones de observables no se pueden utilizar, por lo que se deberán utilizar modelos para reducir el efecto ionosférico. Entre los modelos más utilizados están el modelo Klobuchar, el modelo IRI y el modelo NeQuick, con los que se consigue corregir cerca del 50% del error. Para el caso de receptores doble frecuencia la utilización de combinación de observables llamada “ionosphere-free” elimina el efecto ionosférico para las medidas de fase y pseudodistancia.

3.5.4. Pérdida del ciclo y multipath.

Tal como lo describe (Sanz Subirana et al., 2013). La pérdida de ciclo y multipath (efecto multicamino) ocurre cuando se presenta una interrupción de la señal enviada por el satélite, la cual además de llegar al receptor directamente, llegan por diferentes

caminos, estas pérdidas de ciclo de la señal pueden ocurrir por varios factores como edificaciones, árboles o presencia de vegetación densa y alta. También puede ser producido por mala calidad de la señal por condiciones atmosféricas, receptores en movimiento o la ubicación del satélite.

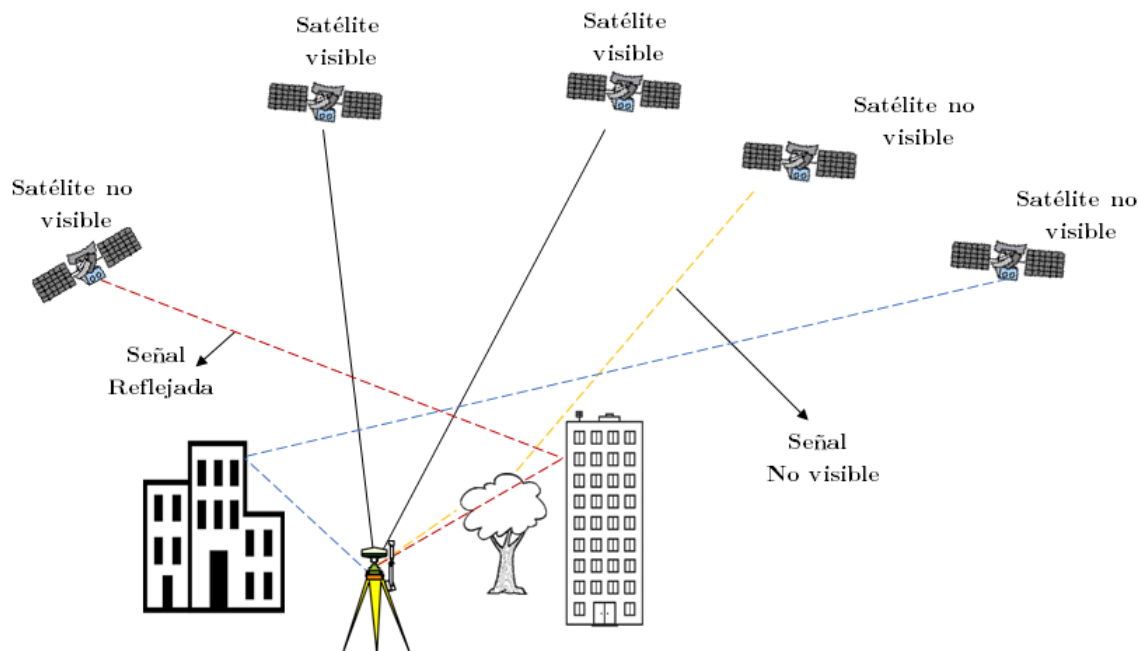


Figura 3.9: Error multipath.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora de acuerdo con (Valero et al., 2019) este error es distinto para cada frecuencia. En observaciones de código, es de dos órdenes de magnitud más grande que en observaciones de fase portadora. Por otro lado, las técnicas existentes para reducir dicho error consisten en la elección de espacios abiertos, con poca presencia de edificaciones y árboles, además de aumentar los tiempos de posicionamiento y la utilización de materiales radio absorbentes alrededor de la antena, las cuales en algunos modelos ya cuenta con este tipo de materiales como es el caso de las antenas Choke Ring o las antenas geodésicas.

3.5.5. Efectos de sitio, cargas y mareas.

Para autores como (Valero et al., 2019) y (Sanz Subirana et al., 2013), la tierra se encuentra sujeta a diferentes tipos de deformación, los cuales pueden ser producidos por fenómenos geofísicos y efectos generados por la atmósfera, la circulación oceánica y la hidrología terrestre de carga. Con respecto a los fenómenos geodinámicos, los cuales hacen referencia a los movimientos de las placas tectónicas, estos son tenidos en cuenta en la alineación de los marcos de referencia internacionales (ITRF), en cuanto las mareas terrestres sólidas, las mareas del polo, la carga oceánica y la carga oceánica deben de ser consideradas en un procesamiento geodinámico y geodésico. (Capilla Romá, 2015)

3.5.6. Retardos y Offsets dependientes de la antena .

Las antenas de acuerdo al propósito de uso, a su tipo o diseño, muestran particularidades diferentes, por lo que en el momento de realizar procesamiento y análisis de observaciones de fase es necesario aplicar tablas de calibración. (Capilla Romá, 2015)

En el caso de los satélites: La medición con GNSS reciben las señales en un punto denotado como centro de fase de la antena, a este punto es necesario realizar una corrección geométrica de acuerdo con la figura (3.10):

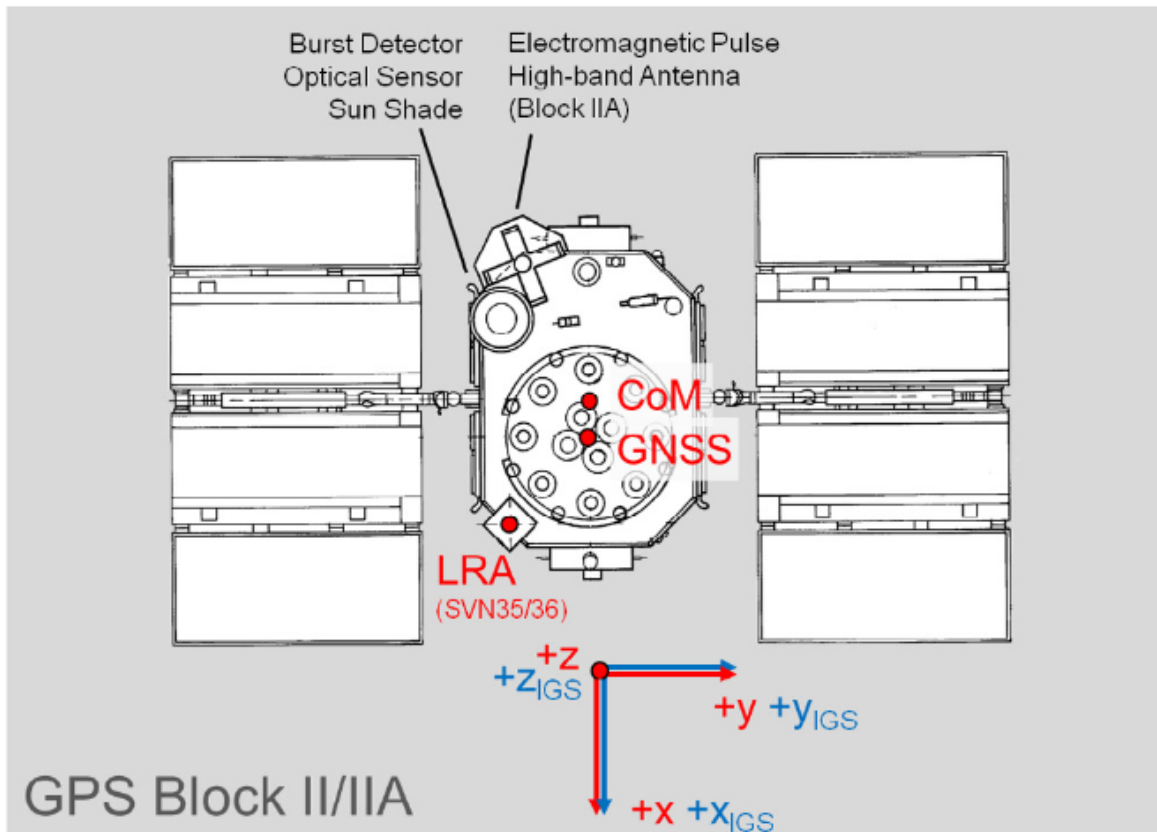


Figura 3.10: Centro de fase de la antena del satélite y Offset
Fuente: Tomado de (Valero et al., 2019)

Las efemérides radiodifundidas y la distancia medida se definen en el centro de masas del satélite (APC) y por otro lado, las órbitas de los satélites, las efemérides precisas y los productos de los relojes se utiliza como punto de referencia el centro de masas del satélite (COM). Esta diferencia entre ambos puntos, Offset, debe ser corregida conociendo la magnitud y dirección del vector. Este proceso de calibración de antenas de los satélites es realizado por el IGS, las cuales se actualizan periódicamente y se obtienen a partir de observaciones a los satélites y ajustes secuenciales por mínimos cuadrados a nivel global. (Valero et al., 2019).

Para el caso de los receptores: Las señales GNSS se toman en un mismo punto, llamado Antenna Phase Centre (APC), al cual es un punto virtual, ubicado en la parte interior/superior de la antena, y que es diferente al punto físico al cual se realizan las mediciones sobre el punto de posicionamiento, el cual es llamado Antenna Reference

Point (ARP), como se observa en la figura (3.11). Para la corrección de este error existen diferentes enfoques, calibraciones en campo relativas, calibraciones en campo absolutas y calibraciones absolutas realizadas en cámara, cada uno de ellos estudiados y desarrollados por distintos autores, tal como se menciona más ampliamente en (Capilla Romá, 2015). El IGS a partir del año 2005 utiliza la calibración absoluta ya que las calibraciones relativas conducían a errores sistemáticos.

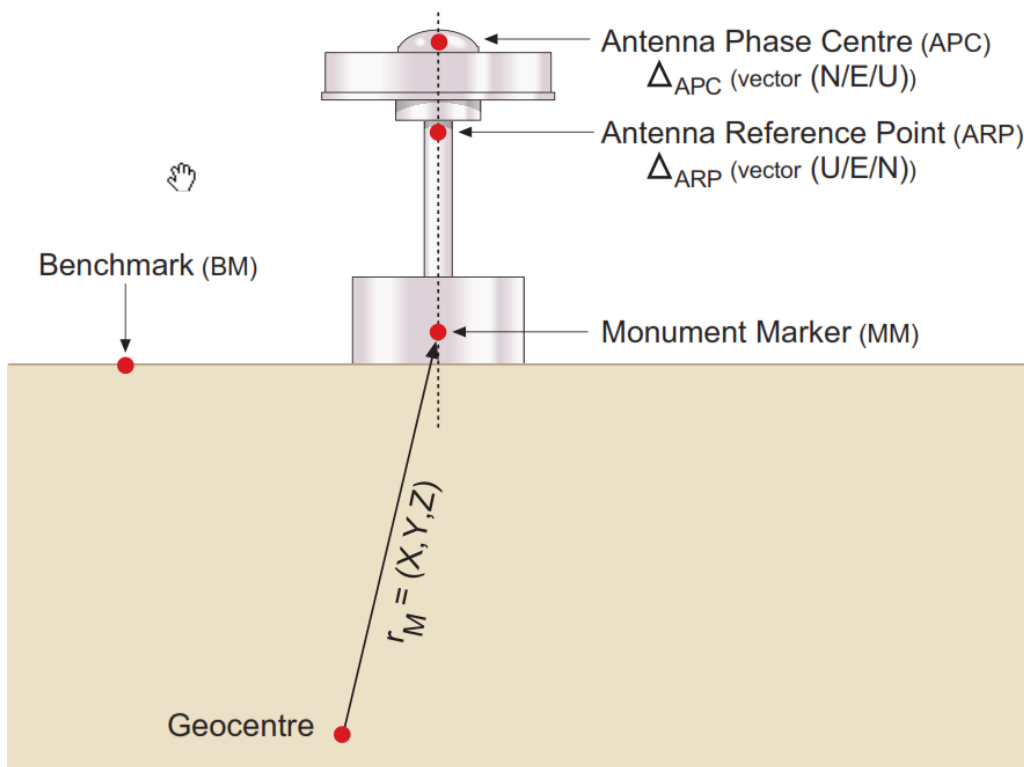


Figura 3.11: Receptor permanente que muestra ARP y APC.
Fuente: Tomado de (Subirana et al., 2013)

3.5.7. Polarización en la señales por la actitud del satélite: Phase Wind-Up.

Debido a que los satélites deben tener los paneles solares orientados hacia el sol y las antenas orientadas hacia la tierra, se producen continuamente cambios en la orientación de la antena, este movimiento hace que varíe el centro de masas del satélite, lo cual afecta principalmente la fase portadora, ya que al ser una onda polarizada, como se observa en la figura (3.12) provoca una diferencia o error de hasta de un ciclo que corresponde a una revolución completa de la antena, efecto llamado como *phase wind-up*. Esta corrección de la antena del satélite por lo general se omite, por ser un valor mínimo si se utiliza posicionamiento relativo en la línea base. (Capilla Romá, 2015)

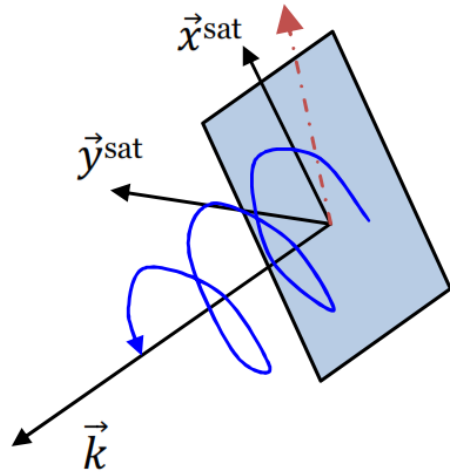


Figura 3.12: Efecto Wind-Up.
Fuente: Tomado de (Capilla Romá, 2015)

3.5.8. Retardos de la señal no calibrados y bias entre observables.

Este tipo de errores se presentan tanto en los observables de la fase portadora como en los de código, los cuales hacen referencia a una combinación de varios efectos que no se pueden separar y que afectan la señal, algunos de ellos se mencionan en (Valero et al., 2019), como, “los retardos de las señales debidos al hardware, retardos por propagación no modelados, inexactitudes de los modelos, la parte fraccional de las ambigüedades y aproximaciones empleadas (por ejemplo, de los modelos de calibraciones de centro de fase).”

Es importante distinguir entre los valores de bias entre sistemas Inter System Bias (ISB), bias entre distintas frecuencias Interfrequency Bias (IFB) o bias entre observables dentro de la misma frecuencia, ya que la denominación bias, y también es utilizada en la teoría y en la practica de la Geodesia espacial. El estudio de este tipo de error se debe tener en cuenta al momento de procesar los productos de GNSS combinados teniendo en cuenta el contexto multiconstelación actual. (Capilla Romá, 2015).

3.6. Métodos de observación y posicionamiento GNSS.

Tal como se mencionó en la figura (1.1), los métodos de posicionamiento GNSS se pueden clasificar y ordenar bajo las siguientes condiciones:

1. Observables
 - Medidas de código
 - Medidas de fase
2. Movimiento de los receptores
 - Estático
 - Cinemático

3. Momento de realizar el calculo

- Posproceso
- Tiempo real
- Absoluto
- Diferencial o Relativo

4. Tiempo de observación

- Estático
- Estático rápido
- Cinemático
- Cinemático RTK

De acuerdo a lo anterior y tomando como referencia que el objeto de estudio del TFM es la técnica PPP, se explican a continuación el posicionamiento absoluto y diferencial o relativo.

3.6.1. Posicionamiento Absoluto.

Desde un solo receptor se obtiene un trío de coordenadas del punto respecto al sistema geocéntrico WGS84 (bien sea cartesianas o geográficas), que podrán ser transformadas a un sistema de referencia proyectado. Se obtiene la posición del punto utilizando medidas de pseudodistancia, ya sea procedentes del código C/A o código P. El cálculo de la posición de un punto mediante la observación al menos a cuatro satélites, bien por pseudodistancia de código o fase, se le denomina posicionamiento absoluto. La Figura (3.13) ilustra esta técnica.

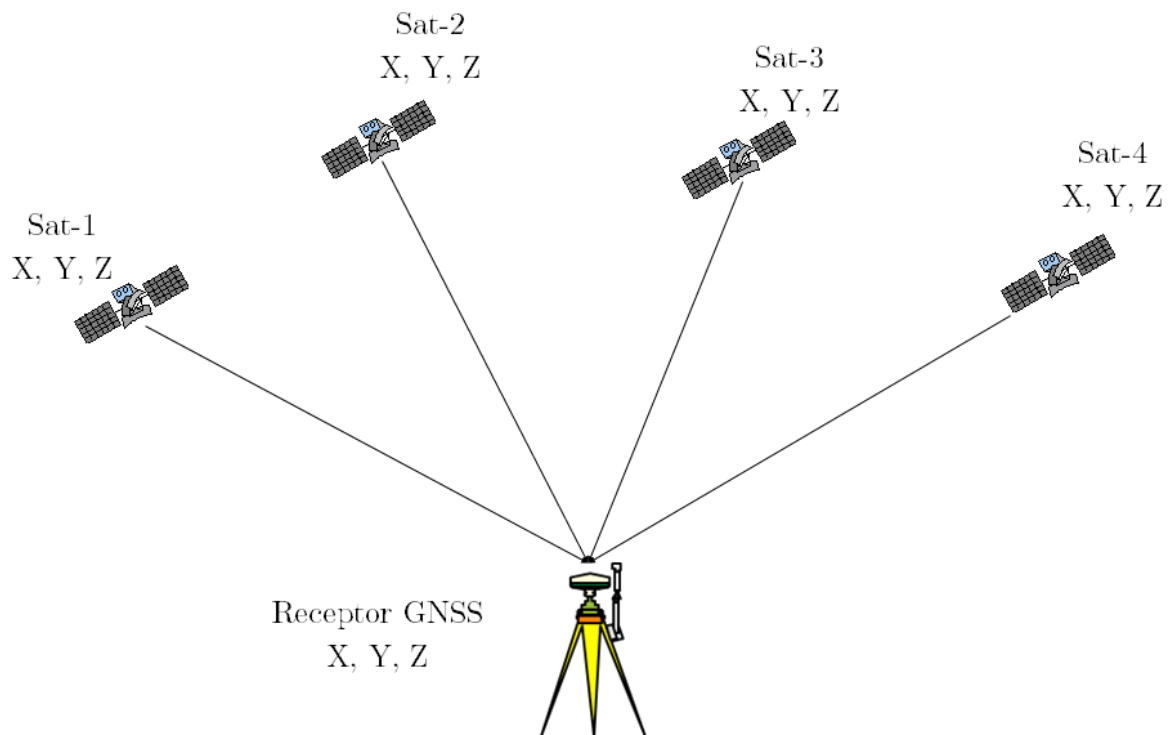


Figura 3.13: Posicionamiento Absoluto.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Posicionamiento Diferencial o Relativo.

Para este posicionamiento se necesitan mínimo dos receptores, el resultado es un incremento de coordenadas $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. Se eliminan la mayoría de los errores, especialmente los atmosféricos y estados de los relojes. También recibe nombres genéricos como “posicionamiento relativo” y/o “GPS diferencial”. El objetivo del posicionamiento relativo consiste en la determinación de las componentes del vector que une dos puntos A y B, donde uno de ellos se establece como fijo, a este vector se le llama base línea o línea base. Este posicionamiento puede hacerse tanto con pseudodistancias como con medidas de fase.

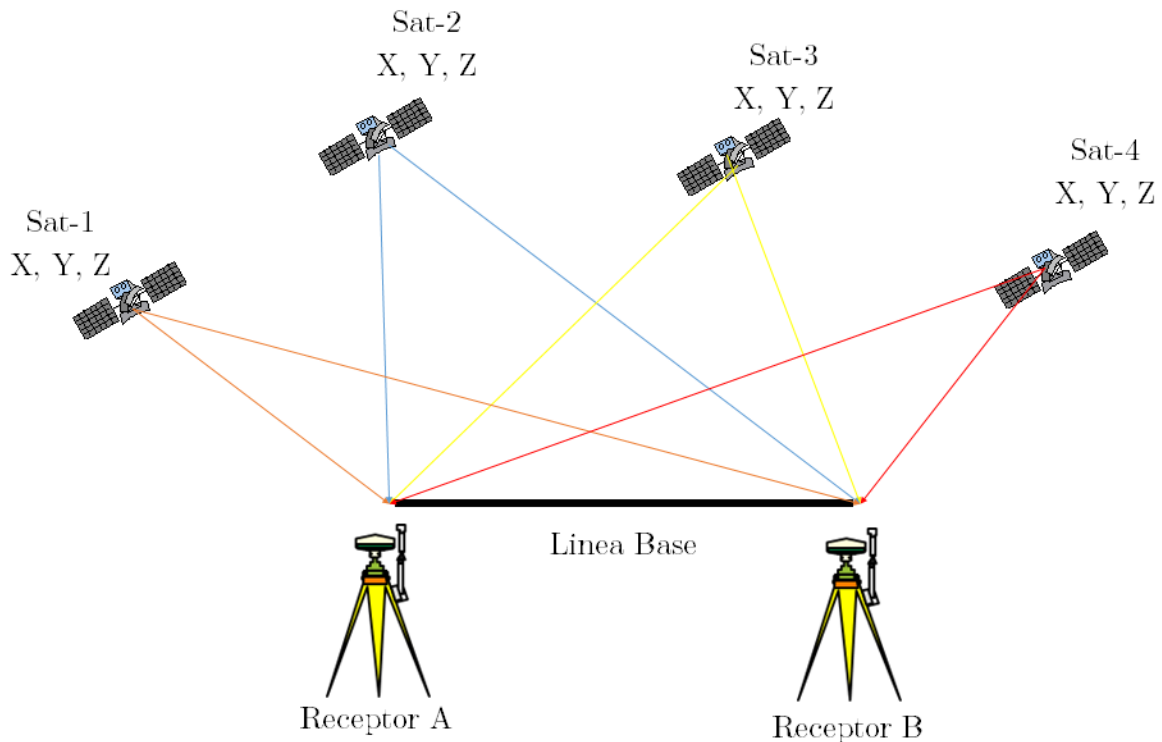


Figura 3.14: Posicionamiento Diferencial o relativo.
Fuente: Elaboración propia.

3.7. Concepto teórico de PPP.

La definición de PPP, se introdujo inicialmente en los años de 1970 y los conceptos teóricos se fundamentan en lo expuesto por (Zumberge et al., 1997) y citado por (Capilla Romá, 2015), por lo tanto, se puede definir PPP, como la técnica de posicionamiento GNSS, que utiliza los modelos matemáticos obtenidos de las combinaciones entre mediciones de código y fase de observaciones GNSS, dirigidas a obtener la solución libre de efecto ionosférico. Estas observaciones se realizan a partir de un solo receptor, así que no es necesario utilizar un segundo receptor para determinar las coordenadas de un punto, es decir no se realizan correcciones diferenciales, en su lugar se usan los datos de las órbitas y modelos de estado del reloj de los satélites. Adicionalmente se incluyen las correcciones de antena, efectos relativistas, variación del centro de fase de la antena. A diferencia del posicionamiento tradicional diferencial, PPP no requiere observaciones simultáneas para resolver las ambigüedades, tal como lo expresa (Leandro et al., 2006b)

Autores como (Valero et al., 2019), sostienen que los datos de las órbitas y relojes de los satélites hoy por hoy, se consiguen fácilmente en tiempo real, a partir de una red global GNSS, dichos datos se colocan a disposición del usuario, mediante un conjunto de servicios generalmente en línea a través de Internet. PPP ofrece una alternativa en la solución de métodos de observación GNSS, debido a que evita las distorsiones locales generadas al utilizar posicionamiento diferencial.

3.8. Modelos matemáticos de PPP.

Considerando los métodos de observación y posicionamiento GNSS descritos en la anterior sección, los errores de órbita, los errores de reloj y las influencias atmosféricas (refracción ionosférica y troposférica). Además, teniendo en cuenta lo expuesto por los autores (Kouba et al., 2017), (Zumberge et al., 1997) (Berné et al., 2014), (Valero et al., 2019), (Leick et al., 2015), (Hofmann-Wellenhof et al., 2011), (Sanz Subirana et al., 2013) y (Capilla Romá, 2015), se puede describir, que el modelo preferido se basa en una combinación libre de ionosfera de pseudodistancia de código y fases portadoras. Por lo tanto, la ecuación respectiva para pseudodistancia o medida de código se obtiene de la ecuación (3.3) y lee como se muestra a continuación:

$$R_i = \rho + c(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + \Delta^{tropo} + \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_i + \Delta_a^{sat} + \Delta_a^{rec} \quad (3.15)$$

Donde:

- R_i = pseudodistancia.
- ρ = es la distancia geométrica entre el satélite y el centro de fase de la antena (APC) del receptor en la época de transmisión y recepción respectivamente.
- c = velocidad de la luz.
- δt_{rec} = es el estado del reloj receptor.
- δt^{sat} = es el estado de reloj del satélite.
- Δ^{tropo} = es el retardo en la señal provocado al atravesar la capa de la troposfera.
- Δ^{iono} = es el efecto ionosférico producido por el paso de la señal por la capa de la ionosfera, y dado su carácter dispersivo, el término va a depender de la frecuencia.
- Δ_m = son los errores debidos al efecto multicamino (multipath) del observable código.
- ε_i = errores debidos a efectos no modelados que contribuyen al ruido de la observación.
- Δ_a^{sat} = corrección centro antena satélite
- Δ_a^{rec} = corrección antena receptor.

Ahora, la expresión para de la medida de fase se toma de la (3.6) y se lee como se expresa a continuación:

$$\Phi_i = \rho + c (\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + \lambda N + \Delta^{tropo} - \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_i + \lambda_i \omega + \Delta_{cf}^{sat} + \Delta_{cf}^{rec} + \lambda_{\Phi}^{sat} + \lambda_{\Phi}^{rec} \quad (3.16)$$

Donde:

- ρ = es la distancia geométrica entre el satélite y el centro de fase de la antena (APC) del receptor en la época de transmisión y recepción respectivamente.
- c = velocidad de la luz.
- δt_{rec} = es el estado del reloj receptor.
- δt^{sat} = es el estado de reloj del satélite.
- λN = representa a la ambigüedad
- Δ^{tropo} = es el retardo en la señal provocado al atravesar la capa de la troposfera.
- Δ^{iono} = es el efecto ionosférico producido por el paso de la señal por la capa de la ionosfera, y dado su carácter dispersivo, el término va a depender de la frecuencia.
- Δ_m = son los errores debidos al efecto multicamino (multipath) del observable código.
- ε_i = errores debidos a efectos no modelados que contribuyen al ruido de la observación.
- $\lambda_i \omega$ = efecto windup de polarización circular de la señal electromagnética con $\lambda_i = \frac{c}{f}$
- Δ_{cf}^{sat} = corrección centro de fase antena satélite.
- Δ_{cf}^{rec} = corrección centro de fase antena receptor.
- λ_{Φ}^{sat} = bias de fase en satélite.
- λ_{Φ}^{rec} = bias de fase en receptor.

Ahora con respecto al termino N'_i , que representa la ambigüedad de carácter flotante se expresa como;

$$N'_i = b_i + \lambda_i \cdot \lambda N \quad (3.17)$$

Siendo b_i un número real que representa al bias del valor entero de N'_i de la ambigüedad, que denota su parte fraccional. Este valor se denomina Uncalibrated Phase Delay (UPD). Esta parte fraccional se divide a su vez en una parte dependiente del receptor y una parte dependiente del satélite tal como lo expresa (Sanz Subirana et al., 2013) en la ecuación (3.18).

$$b_i = b_{iR} - b_i^S \quad (3.18)$$

3.8.1. Combinación libre de ionosfera.

Partiendo de la combinación de los observables en mas de una frecuencia, se plantea la posibilidad de reducir el error ionosférico. Tomando como referencia las ecuaciones (3.3) y (3.6), se plantea la combinación de libre de ionosfera, para P_c y Φ_c , el cual elimina el efecto ionosférico de primer orden, es así como (Capilla Romá, 2015), plantea la ecuación (3.19):

$$P_C = \frac{f_{L1}^2 P_{L1} - f_{L2}^2 P_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \quad \Phi_C = \frac{f_{L1}^2 \Phi_{L1} - f_{L2}^2 \Phi_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \quad (3.19)$$

Como lo indica Valero et al. (2019), gracias a estas combinaciones, se da origen a nuevos observables con diferentes longitudes de onda, que facilitan la resolución de ambigüedades. Por otro lado, además de la combinación libre de ionosfera (*Ionosphere-free*), se pueden determinar las siguientes combinaciones:

- Combinación libre de geometría L_4
- Combinación *Narrow-lane*, o conocida también como L_w o L_5
- Combinación *Narrow-lane* o L_6
- Combinación *Melbourne-Wübbena*

Para empezar con estos modelos, mencionemos en primer lugar a la combinación lineal de fase, la cual se observa en la ecuación (3.20): Valero et al. (2019)

$$\Phi = N_1 \Phi_1 + N_2 \Phi_2 \quad (3.20)$$

Donde Φ_i corresponde con la medida de la portadora.

Combinación libre de ionosfera

Tomando las ecuaciones (3.3) y (3.6), la combinación libre de ionosfera queda expresada en la ecuación (3.21) y (3.22). Valero et al. (2019)

$$P_c^j = \rho^j + c(\delta t_{rec} - \delta t^j) + Tr^j + M_c^j + \varepsilon_c^j \quad (3.21)$$

$$\Phi_c^j = \rho^j + c(\delta t_{rec} - \delta t^j) + Tr^j + \lambda_N \omega^j + B_c^j + m_c^j + \varepsilon_c^j \quad (3.22)$$

Donde:

- $P_c =$ es la combinación de pseudodistancia no suavizada para el satélite j
- $\Phi_c =$ la correspondiente a la medida de fase
- $\rho =$ está referida al centro de fase de la antena en esta combinación
- $B_c =$ la ambigüedad flotante de la combinación libre de ionosfera

Es importante resaltar que el termino $B_c =$ se puede expresar de la misma manera en función de las siguientes combinaciones de observables; *Narrow-lane*, *Narrow-lane* y de la combinación *Melbourne-Wübbena*, tal como se expresa en la ecuación (3.23):Capilla Romá (2015).

$$B_c = b_c + \lambda_N \left(N_1 + \left(\frac{\lambda_W}{\lambda_2} \right) N_W \right) \quad (3.23)$$

Donde:

- $\lambda_N = \frac{c}{(f_{L1}+f_{L2})}$ = procedente de la combinación *Narrow-lane* $\lambda_W = \frac{c}{(f_{L1}-f_{L2})}$
- $N_W =$ proceden de la combinación $N_1 \sim N_2$ (*Narrow-lane*).

Combinación *Narrow-lane*

Continuando con la combinación *Narrow-lane* Lw también conocida como L_5 , se expresa mediante la ecuación (3.24) para un instante t_i . Capilla Romá (2015).

$$L_W = \frac{f_{L1}\Phi_{L1}(t_i)\lambda_{L1} - f_{L2}\Phi_{L2}(t_i)\lambda_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \quad (3.24)$$

Para la medida de pseudodistancia se desarrolla de manera similar. Siendo para el resto de las magnitudes.

$$f_w = f_{L1} - f_{L2} \quad (3.25)$$

Dando origen a la observable de frecuencia $f_W = 347,82MHz$, la cual en función de su longitud es superior a $L1$ y $L2$.

Combinación *Narrow-lane*

Seguidamente, la combinación *Narrow-lane* o L_6 , se obtiene de la adición entre las portadoras, tal como se expresa en la ecuación (3.26). Sanz Subirana et al. (2013)

$$\Phi(t_i) = \Phi_{L1}(t_i) - \Phi_{L2}(t_i) \quad (3.26)$$

Combinación *Melbourne-Wübbena*

Mediante esta combinación se proporciona la estimación de la ambigüedad *Narrow-lane* (flotante) denotada como B_W , de acuerdo con la ecuación (3.27). Capilla Romá (2015).

$$B_W = \lambda_W N_W + b_W + \varepsilon_{MW} = \Phi_W - P_N \quad (3.27)$$

Donde:

- $N_W =$ son las ambigüedades enteras *Narrow-lane* estimadas.
- $b_W =$ incluye los bias del satélite y el receptor
- $\varepsilon =$ es la medida del ruido (Incluye el multipath de la fase como del código)

Combinación de libre geometría

Puede aplicarse sobre el observable de fase y el de código. Se genera a partir de dos medidas en diferentes frecuencias, con la ventaja de que todos los errores no dependientes de la frecuencia se anulan, denotando la expresión de libre geometría de la observación de fase en la ecuación (3.28) y para la observación de pseudodistancia observar la ecuación (3.29). (Sanz Subirana et al., 2013)

$$\Phi_4 = \Phi_{L1} - \Phi_{L2} \quad (3.28)$$

$$P_4 = P_{L2} - P_{L1} \quad (3.29)$$

3.8.2. Modelo lineal de observación en PPP.

Según lo explica (Capilla Romá, 2015), para cada satélite j con $j = 1 \dots n$, el modelo lineal de observación $y = Gx$ para las combinaciones de pseudodistancia y fase, P_c y Φ_c , puede ser escrito mediante la ecuación como se muestra a continuación (3.30).

$$y = \begin{bmatrix} P_C^1 - \rho_0^1 + c\delta t^1 - Tr_0^1 \\ \Phi_C^1 - \rho_0^1 + c\delta t^1 - Tr_0^1 - \lambda_N \omega^1 \\ \dots \\ P_C^n - \rho_0^n + c\delta t^n - Tr_0^n \\ \Phi_C^n - \rho_0^n + c\delta t^n - Tr_0^n - \lambda_N \omega^n \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Donde:

- δ_t^j = incluye opcionalmente la corrección relativista del reloj del satélite
- Tr_0 valor nominal de la corrección troposférica

El retardo troposférico Tr_0 puede descomponerse en dos términos; el primero en el término nominal $Tr_0(E)$ y el segundo en la desviación de este termino denominada húmeda del retardo troposférico y se denota como $M_{wet}(E) \Delta Tr_{z,wet}$, en conclusión tenemos la ecuación (3.31) y la ecuación (3.33) tal como se observa a continuación (Sanz Subirana et al., 2013)

$$Tr(E) = Tr_0(E) + M_{wet}(E) \Delta Tr_{z,wet} \quad (3.31)$$

$$Tr_0(E) = Tr_{z,dry} M_{dry}(E) + Tr_{z0,wet} M_{wet}(E) \quad (3.32)$$

Donde:

- $Tr_{z,dry}$ = representa la componente seca
- $\Delta Tr_{z,wet}$ = denota a una mapping function o función de mapeo utilizada para la troposfera y es un elemento de la matriz de diseño G ,
- $\Delta Tr_{z,wet}$ = es una componente del vector de parámetros a determinar x

La matriz del sistema G y el vector x se expresan en las ecuaciones (3.33) y (3.34), respectivamente: (Sanz Subirana et al., 2013)

$$G = \begin{pmatrix} \frac{x_0-x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0-y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0-z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0-y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0-z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_0-x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0-y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0-z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0-y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0-z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_0-x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0-y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0-z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0-y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0-z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$x = [dx, dy, dz, \delta t, \Delta Tr_{z,wet} B_C^1, \dots, B_C^k, \dots B_C^n]^T \quad (3.34)$$

Tal como lo indica x (Sanz Subirana et al., 2013), las observaciones de muchos satélites, se pueden procesar en conjunto utilizando un filtro que resuelve las incógnitas del vector. Es así como algunas aplicaciones utilizan filtros secuenciales, que se adaptan según las necesidades del receptor y no se limita la evolución del estado del reloj y las ambigüedades son constantes. Existe otro algoritmo que se utiliza para la soluciones PPP, denominado (*Batch Algorithm*), en él el estado del reloj del receptor se considera época a época, las coordenadas se ajustan tanto en modo estático y cinemático. Finalmente el rendimiento de PPP depende del modelamiento los términos como; estados del reloj del satélite, las posiciones orbitales, los errores atmosféricos explicados anteriormente.

3.9. Características de PPP.

3.9.1. Aplicaciones.

De acuerdo a lo explicado por (Bisnath and Gao, 2009), la técnica PPP puede usarse para procesar datos estáticos y cinemáticos, tanto en tiempo real, si los mecanismos de difusión están en su lugar para construir, transmitir, recibir y procesar productos precisos de reloj y órbita satelital, y en modo de posprocesamiento. La recomendación para todo este uso es que no debe haber interrupción de la señal GNSS, ya que por perdida y/o bloqueo de seguimiento en un número mínimo de satélites requiere la reinicialización del filtro de procesamiento, lo que incrementa el tiempo de posicionamiento y disminuye la precisión. Esta restricción limita considerablemente la utilidad de PPP, en la medida en que solo se recomienda usar en entornos con cobertura continua a cielo abierto.

Tomando como referencia lo que expone (Teunissen and Khodabandeh, 2015), el avance tecnológico los GNSS en los últimos años, ha permitido que en el método de posicionamiento PPP se destaquen las siguientes aplicaciones;

- Percepción remota de la atmósfera.
- La topografía.

- La construcción.
- Las fuerzas militares.
- Seguimiento de la corteza terrestre.
- Monitorear de vapor de agua.
- Determinación precisa de la órbita terrestre.
- Agricultura de precisión.
- Mapeo del suelo marino.
- Densificar los sistemas de referencia.
- Procesar datos cinemáticos y estáticos.
- Monitoreo de deslizamientos de tierra

3.9.2. Ventajas y Desventajas

De acuerdo con lo expuesto por algunos autores como (Kouba et al., 2017), (Bisnath and Gao, 2009), (Berné et al., 2014) entre otros y lo consolidado en el desarrollo de este TFM, la técnica PPP ofrece beneficios importantes en comparación con los métodos de observación y posicionamiento diferencial, las cuales se explican a continuación:

Ventajas:

- Al utilizar un solo receptor GNSS, disminuyen los costos operacionales tanto de mano de obra como de equipos, simplificando la logística en el trabajo de campo. El trabajo en oficina también se ve considerablemente reducido, ya que un posprocesamiento diferencial toma alrededor de 3 horas, mientras que un posprocesamiento utilizando servicios en línea, tan solo toma 5 minutos.
- Desaparecen las limitaciones en cuanto a la longitud del vector de la línea, es decir la distancia entre un equipo base y móvil.
- No es necesario utilizar estaciones CORS y/o vértices geodésicos de primer orden cercanos al lugar de observación para determinar las coordenadas de un punto, como si es el caso del posicionamiento diferencial o relativo.
- Con respecto al uso de los productos ofrecidos por el IGS, bien sea las soluciones finales, rápidas o ultra rápidas, se producen resultados que varían a nivel de decímetro o centímetro según sea el caso.
- Existen muchos servicios en línea de carácter gratuito para el posprocesamiento PPP de los datos GNSS, aunque no existe un estándar para su uso, ya que dependiendo del servicio se solicitan más o menos parámetros de entrada.
- Las posiciones obtenidas mediante la técnica PPP quedan referidas directamente al ITRF2014 en la gran mayoría de los servicios en línea consultados, sin embargo se debe considerar el cambio de época para algunos resultados ya que las coordenadas quedan referidas a la época de posicionamiento.

- Existen un gran desarrollo científico en cuanto al número de aplicaciones que ofrece este método, las cuales van más allá de estimar la posición de un punto mediante posicionamiento cinemático y estático.
- La comunidad científica de la Geodesia Espacial se esta trabajando intensamente en desarrollar y llevar el posicionamiento PPP en tiempo real con un solo (*rover*), para que se puedan realizar las correcciones a través de protocolos de comunicación como Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM).
- En tiempo real, también se han hecho desarrollos tecnológicos directamente sobre el (*firmware*) de algunos receptores, como es el caso del (*Novatel Flex 6*), receptor GNSS de triple frecuencia.
- Existe la posibilidad de realizar tiempo real a través del protocolo NTRIP y de las librerías y herramientas desarrolladas por RTKLIB
- Existen ciertos efectos que no pueden ser modelados en el caso del posicionamiento diferencial, como: desplazamientos de sitio, efectos relativistas, efecto wind-up, valores asociado al centro de fase de la antena del satélite y del receptor, retrasos atmosféricos, efectos de carga oceánica o mareas terrestres.
- La integración de PPP con los sistemas inerciales INS, se ha desarrollado en principio para fines de georreferenciación en fotogrametría aérea es posible.

De la misma manera se presenta las desventajas o limitaciones de la técnica PPP:

Desventajas:

- Según lo explica (Capilla Romá, 2015), el tiempo de inicialización, que limita su uso en aplicaciones en tiempo real básicamente por la dificultad en la cancelación de errores y resolución de ambigüedades al trabajar con observaciones absolutas.
- Como desventaja principal de PPP, se encuentra que los tiempos de convergencia son muy largos para que la solución flotante de las ambigüedades de la fase converja.
- De acuerdo a lo expuesto por (Bisnath and Gao, 2009), se relaciona con la precisión y exactitud, ya que actualmente PPP puede ofrecer algunos resultados a nivel de centímetro en modo estático y a nivel de decímetro en modo cinemático.
- No existen modelos atmosféricos completos para ser aplicados en la técnica PPP en tiempo real.
- Como se menciona en la sección 3.8.2, es necesario realizar la combinaciones lineales para corregir los efectos ionosférico, razón por la cual se hace obligatorio el uso de receptores GNSS doble frecuencia, esto significa que los receptores L1 no son aptos para la técnica PPP.

Capítulo 4

Instrumentación.

Tal como lo menciona la Agencia Espacial Europea (ESA), en la pagina de (Navipedia, 2019), el posicionamiento absoluto PPP se destaca como un enfoque óptimo para proporcionar un posicionamiento de error de nivel centimétrico utilizando las constelaciones GNSS. Esta técnica procesa mediciones desde un receptor de usuario único, utilizando modelos físicos detallados, y productos de órbitas precisas y reloj GNSS calculados por los centros de procesamiento como el IGS. Como se ha mencionado anteriormente, PPP difiere de otros técnicas de posicionamiento como RTK y GDGPS en que no se necesita estaciones de referencia para determinar la posición de un usuario. Otra ventaja es que, dado que los productos de órbita y reloj GNSS son globales, las soluciones PPP también son globales. Por otro lado, varios productos de software que implementan una estrategia de procesamiento PPP han sido desarrollados recientemente por agencias gubernamentales, universidades, industrias y particulares. También hay algunos servicios PPP en línea disponibles. En este capítulo se resumen las características de los paquetes informáticos y servicios online para el procesamiento PPP. De la misma manera se realiza una descripción de el software Trimble Business Center (TBC), el cual se ha utilizado para el procesamiento diferencial de datos GNSS.

4.1. Software para procesamiento diferencial de datos GNSS.

Para realizar el procesamiento diferencial de los datos GNSS, se ha utilizado el software TBC, la razón principal de esta decisión obedece, a que TBC es un software comercial y por lo tanto se requiere de una licencia, el autor de este documento cuenta esta para fines comerciales y académicos. La licencia permite realizar el cálculo y ajuste de la red, así como generar los reportes necesarios del proceso.

4.1.1. Trimble Business Center (TBC).

Trimble Business Center (TBC) ha reemplazado a Trimble Geomatics Office (TGO) como el software de procesamiento de datos GPS de Trimble. En el desarrollo de este TFM, se contó con una licencia actualizada a la versión 3.5, ver figura 4.1.



Figura 4.1: Licencia de Trimble Business Center (TBC).

Fuente: Tomado de TBC

La suite TBC es una aplicación de escritorio para procesar y administrar datos de mediciones ópticas, GNSS e imágenes satelitales. Se puede utilizar para mediciones estáticas o cinemáticas posprocesadas, TBC requiere una licencia para habilitar completamente su funcionalidad, incluido el procesamiento de línea base GPS. No se necesita una licencia para ver y exportar resultados procesados de mediciones RTK. A continuación, en (UNAVCO, 2019), se presentan algunas características de TBC:

- Edita, procesa y ajusta datos de mediciones ópticas, GNSS e imágenes satelitales.
- Importa datos directamente desde el campo.
- Edita rápida y fácilmente RTK y datos de la estación total.
- Interfaz con diseño, dibujo y sistemas GIS.
- Compatible con el conjunto de soluciones GNSS, ópticas y UAS de Trimble
- Opciones de licencia flexibles (ediciones Base, Completa y Avanzada) y posibilidad de módulos adicionales opcionales (Fotogrametría).

4.2. Servicios en línea para procesamiento absoluto de datos GNSS.

Según lo explica (Kouba et al., 2017), la disponibilidad de órbitas y relojes precisos GNSS globales de diversas fuentes ofrecen la oportunidad de desarrollar e implementar servicios posicionamiento y navegación basados en PPP. Los servicios posprocesados de PPP para el posicionamiento tanto estático como cinemático están demostrando ser

particularmente ventajosos y eficientes para la densificar marcos de referencia y para establecer el control geodésico en áreas donde las redes geodésicas no poseen buena distribución y cubrimiento o sencillamente no existen. lo que ha llevado a que sean acogidos por unos cuantos países como una forma eficaz de complementar y reducir la infraestructura costosa de las densas redes de monumentos geodésicos tradicionalmente utilizados para proporcionar acceso a los marcos de referencia geodésicos nacionales. Es por esta razón que ahora distintas instituciones brindan servicios de PPP posprocesados basados en Internet para cumplir esa función. De la misma manera, se ha generado que en los últimos años surjan servicios de posicionamiento y navegación basados en PPP en tiempo real (PPP-RT), los cuales suelen ser más costosos de operar y tienden a ofrecerse comercialmente a mercados especializados como la agricultura, la exploración y explotación de recursos naturales marinos y terrestres. Los servicios PPP posprocesados, suelen ser más precisos que lo servicios PPP-RT.

Como se observa en la figura 4.2, las técnicas de posicionamiento PPP se pueden aplicar a métodos de observación en modo (Estático, Cinemático y RTK). Así mismo se cuenta con servicios posprocesados y en tiempo real. Por último se aprecia que los servicios posprocesados pueden ser en línea (Online) y también se puede utilizar software de escritorio (Offline).

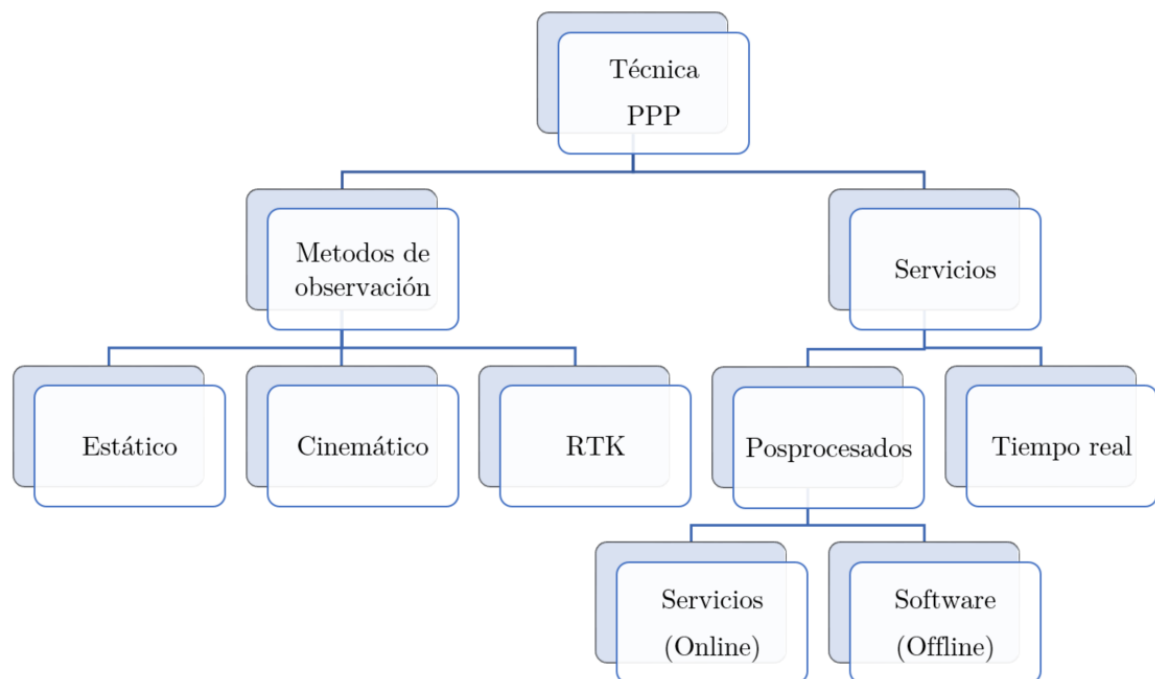


Figura 4.2: Técnicas de posicionamiento PPP.
Fuente: Elaboración propia.

Tomando como referencia el último nivel de la figura 4.2, se presenta a continuación, la descripción y características de los centros de servicios mas reconocidos en el procesamiento de datos GNSS, bajo la modalidad de la técnica PPP Online, ver figura 4.3.

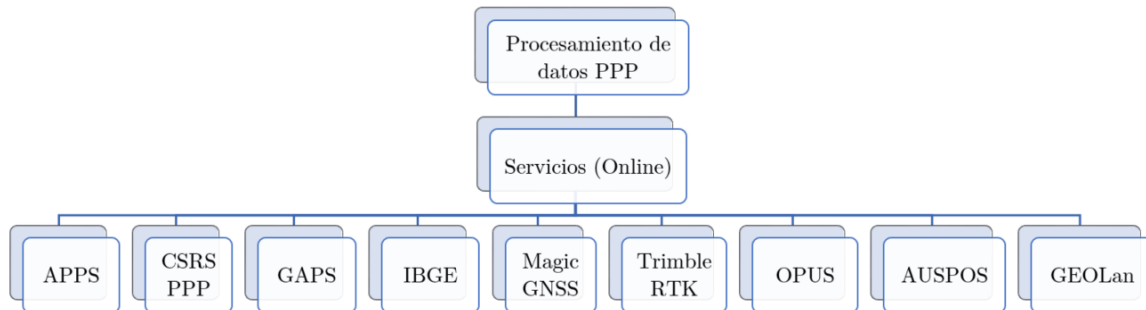


Figura 4.3: Servicios PPP para procesamiento Online.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Automatic Precise Positioning Service (APPS).

El primer centro de procesamiento utilizado fue Automatic Precise Positioning Service (APPS), que según lo consultado en (NASA's Jet Propulsion Laboratory, 2019a), es un servicio en línea que presta la NASA, el cual acepta archivos de medición de GPS y aplica la tecnología de posicionamiento GPS más avanzada de JPL (Jet Propulsion Laboratory de la NASA) para estimar la posición de sus receptores de GPS, ya sean estáticos, o cinemáticos. APPS utiliza;

- Productos de reloj y órbita GPS en tiempo real del sistema GDGPS de JPL.
- Productos de reloj y órbita GPS precisos diarios y semanales de JPL.
- El software GIPSY-OASIS de JPL para procesar las mediciones GPS.
- La siguiente dirección de Internet (<http://apps.gdgps.net/>), para enviar los datos y así hacer uso del servicio.

APPS continúa brindando el servicio AutoGIPSY (AG) de JPL, de forma gratuita, para el posprocesamiento estático (por ejemplo, latencia de medición de una semana o más), pero también ofrece servicios nuevos y únicos;

- APPS generará una serie temporal de posiciones si su receptor estaba en movimiento.
- APPS tiene acceso a productos de reloj y órbita GPS en tiempo real para que nunca tenga que esperar.
- APPS es rápido. El posicionamiento está disponible en segundos.

APPS admite una base de clientes diversa, desde usuarios ocasionales hasta usuarios industriales de servicio pesado. Los usuarios ocasionales pueden cargar sus archivos de medición manualmente a través del sitio web. Los usuarios de servicios pesados recibirán acceso ftp seguro a los servidores, a los que pueden cargar sus archivos de medición y automatizar más fácilmente su procesamiento. También es posible interactuar con

APPS a través de correo electrónico. (NASA's Jet Propulsion Laboratory, 2019a). En este servicio, los datos que se suben al sitio web es el fichero de observación (*.N), el cual hace parte de los archivos RINEX. En la figura 4.4, se observa el formulario principal del sitio web de APPS. Para poder cargar la información existen dos opciones en los tipos de usuarios;

1. Usuarios sin registrar (pueden subir 1 archivo, con un peso máximo de 5 MB).
2. Usuarios registrados (pueden subir 1 archivo, hasta 10 MB como máximo de peso).

Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

GDGPS
Jet Propulsion Laboratory

+ View the NASA Portal

JPL HOME EARTH SOLAR SYSTEM STARS & GALAXIES TECHNOLOGY

The Automatic Precise Positioning Service
of the
Global Differential GPS System

Home
Unique Features
About GDGPS
How to use APPS
Under The Hood
Instant Positioning

Instant Positioning

APPS Options	
Processing Mode	<input checked="" type="radio"/> Static <input type="radio"/> Kinematic
Measurement Type	<input type="radio"/> Single Frequency <input checked="" type="radio"/> Dual Frequency
Orbits/Clocks used	JPL Final: Data prior to 2019-08-17 JPL Rapid: Data from 2019-08-17 to 2019-08-24 JPL Ultra R/T: Data from 2019-08-24 to present
L1 Code	<input type="radio"/> CA Code <input checked="" type="radio"/> P Code
Model Pressure Data?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Elevation Dependent Data Weighting	<input checked="" type="radio"/> Flat <input type="radio"/> Sin <input type="radio"/> Sqrt(sin)
Advanced Options	<input type="text" value="7.5"/> Elevation Angle Cutoff <input type="text" value="300"/> Solution Output Rate (seconds)

Seleccionar archivo No se eligió archivo

Reset Upload

*A maximum of 10MB is allowed for upload.

Figura 4.4: Formulario del servicio PPP online APPS.
Tomado de (Canada., 2014)

4.2.2. Canadian Spatial Reference System PPP (CSRS-PPP).

El siguiente centro de procesamiento utilizado fue Canadian Spatial Reference System PPP (CSRS-PPP), que según lo expuesto en (Canada., 2014) es una aplicación en línea para el posprocesamiento de datos GNSS que permite a los usuarios calcular posiciones de mayor precisión a partir de sus datos de observación sin procesar. CSRS-PPP usa las órbitas de la órbita satelital GNSS para producir coordenadas corregidas con una precisión absoluta y constante, sin importar en qué lugar del mundo se encuentre, independientemente de la proximidad a las estaciones base conocidas.

Los usuarios pueden enviar datos de observación RINEX de receptores de frecuencia simple o doble que funcionan en modo estático o cinemático a través de Internet y recuperar precisiones de posicionamiento mejoradas en el International Terrestrial Reference Frame (ITRF). El Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada actualizó el servicio CSRS-PPP el jueves 16 de agosto de 2018. Esta actualización incluyó la transición a un nuevo software de procesamiento (SPARK) que reemplazó al software anterior (GPSPACE).

Para utilizar el servicio CSRS-PPP, es necesario que previamente se cree un usuario y una contraseña, luego debemos diligenciar el formulario que se observa en la figura 4.5.



Natural Resources Canada

Canada

Our Natural Resources | Climate Change | Energy Efficiency | Maps, Tools and Publications | Public Consultations | Science and Data

Home → Maps, Tools and Publications → Tools → Geodetic Reference Systems → Tools and Applications → Precise Point Positioning

Precise Point Positioning

CSRS-PPP Service Upgrade

The Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada updated the CSRS-PPP service on Thursday, August 16th 2018. This update included the transition to a new processing software (SPARK) which replaced the previous software (GPSPACE). Information detailing the file formats for all updated output files is available on the [modernized CSRS-PPP service page](#). Sample static and kinematic solutions are also available for download to allow you to familiarize yourself with the new outputs.

New velocity grid NAD83(CSRS)v7

[View documentation](#) about the new NAD83(CSRS) v7.0 velocity grid.

▶ Help for CSRS PPP (Updated 2019-02-27) Profile Sign out

✔ The file **bogt1840.19o** was successfully submitted for processing.
The results will be emailed to **jalexorduna@gmail.com**.

Email for results (required)
jalexorduna@gmail.com

Processing mode
 Static Kinematic
 NAD83 ITRF

- The epoch will be the same as the GPS data.
- A UTM zone will be calculated from the longitude.

Figura 4.5: Formulario del servicio PPP online PPP CSRS.

Fuente: Tomado de (Canada., 2014)

Por último, y a diferencia del servicio APPS, CSRS-PPP, envía los datos de procesamiento a la dirección de correo electrónica que se utilizó para crear la cuenta. En este caso los resultados llegaron 3 minutos después de haberse enviado los datos.

4.2.3. GNSS Analysis and positioning software (GAPS).

El siguiente centro de procesamiento utilizado fue el GNSS Analysis and positioning software (GAPS), el cual, según lo consultado en (GAPS, 2019), se define como un software desarrollado por la Universidad de New Brunswick, el cual proporciona a los usuarios un posicionamiento satelital preciso utilizando un solo receptor GNSS tanto en modo estático como cinemático. Mediante el uso de productos de órbita y reloj precisos proporcionados por fuentes como IGS y Natural Resources Canada (NRCAN), es posible lograr un posicionamiento de nivel de centímetro en modo estático y un posicionamiento de nivel de decímetro en modo cinemático dado un período de convergencia suficiente. En este centro de servicio los datos se pueden enviar de dos maneras, tal como se explica a continuación;

1. **Modo básico;** mediante esta modalidad se deben configurar los siguientes parámetros:
 - Seleccionar el archivo de observación de entrada, es decir el fichero (*.O).
 - Seleccionar sistema, es indicar con que constelaciones de desea realizar el procesamiento (GPS, GALILEO, BeiDou).
 - Las coordenadas aproximadas del punto objeto de cálculo. El formato de las coordenadas, pueden ser Geocéntricas o Geográficas.
 - Tipo de posicionamiento, estático o cinemático.
 - Ángulo de la máscara de elevación
 - Finalmente solicita un correo electrónico para recibir los resultados.
2. **Modo avanzado;** Aparte de la configuración del modo básico, se pueden definir los siguientes parámetros:
 - Seleccione productos de órbita y reloj.
 - Seleccionar observables GPS.
 - Seleccione Galileo Observables.
 - Seleccione BeiDou Observables.
 - Tiempos para el procesamiento de datos.
 - Retardo de atmósfera neutral.
 - Seleccionar tipo de KML cinemático.
 - Calibración de la antena del receptor del usuario.
 - Efectos de desplazamiento del sitio.
 - Marco de referencia.

En nuestro caso se ha trabajado el módulo básico, y para ello se ha diligenciado el formulario tal como se muestra en la figura 4.6. De la misma manera, que en el servicio CSRS-PPP, los resultados llegan al correo indicado en el formulario. Los resultados y comentarios se encuentran el capítulo 6.



GAPS
GNSS ANALYSIS AND POSITIONING SOFTWARE

CASA ACERCA DE ENVIAR UN ARCHIVO PUBLICACIONES NOTICIAS
CONTACTO

Envío de usuario básico de GAPS

Seleccione el archivo de observación de entrada: * bogt1840.19o

Seleccionar sistema

GPS	<input checked="" type="radio"/> En	<input type="radio"/> Apagado
Galileo	<input type="radio"/> En	<input checked="" type="radio"/> Apagado
BeiDou	<input type="radio"/> En	<input checked="" type="radio"/> Apagado

Figura 4.6: Formulario del servicio PPP online GAPS.
Fuente: Tomado de (GAPS, 2019)

4.2.4. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Ahora continuamos con el siguiente centro de procesamiento EL Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), el cual, según lo expuesto en (IBGE-PPP, 2019), es un servicio online gratuito para el posprocesamiento de datos GNSS, que hace uso del programa CSRS-PPP desarrollado por el Natural Resources Canada (NRCan). Este servicio permite a los usuarios con receptores GPS y/o GLONASS, obtener coordenadas referenciadas al SIRGAS y al ITRF a través de un procesamiento preciso. El IBGE-PPP procesa datos GNSS (GPS y GLONASS) que fueron recogidos por receptores de una o dos frecuencias en el modo estático o cinemático.

Selecione o Modo de Processamento: Estático Cinemático

Selecione um arquivo RINEX: Só serão aceitos arquivos no formato .05d a .20d, .05D a .20D, .05o a .20o, .05O a .20O, .obs, .zip, .tar, .tgz, .gz, .rnz, .crx, .7z

Selecionar arquivo bogt1840.19o

Os valores selecionados abaixo serão adotados para todos os RINEX que estejam comprimidos em um único arquivo:

Tipo de Antena: Nao alterar RINEX

Altura da antena (m): 0.0610

A altura da antena somente será alterada se esta caixa estiver marcada.

E-mail válido do usuário. (não pode conter espaços ou tabs!):

jalexorduna@gmail.com

Concordo que os resultados dos processamentos poderão ser utilizados pelo IBGE para a avaliação de produtos e informações cartográficas e geodésicas, bem como para a avaliação do próprio serviço IBGE-PPP

Nota: O processamento iniciará após a transferência do arquivo, o que pode demorar alguns minutos. Caso o resultado não comece a aparecer em 2 horas, por favor reprocesse.

Processar Limpar Dados

Figura 4.7: Formulario del servicio PPP online IBGE.
Fuente: Tomado de (IBGE-PPP, 2019)

Como se observa en la figura 4.7. Sólo es necesario que el usuario cargue o suba el archivo de observación en el formato RINEX, si el levantamiento se realizó en el modo estático o cinemático, el modelo y la altura de la antena utilizada, y un e-mail válido. Al final del proceso los resultados llegan a vuelta de correo electrónico.

4.2.5. MagicGNSS.

Producto desarrollado por la empresa española (GMV Aerospace and Defense SA), es un herramienta multiuso, entre ellos el cálculo de coordenadas precisas del receptor. A diferencia de los otros servicios PPP online que se han explicado, en MagicGNSS, no se diligencian formularios para el envío de los datos. Lo que se debe es enviar un correo a la siguiente dirección magicgnss@magicgnss.gmv.com, en donde se adjuntan los archivos RINEX 2.11 y a vuelta de correo se reciben los resultados, que llegan en un periodo aproximado de 3 minutos.(GMV Aerospace and Defense SA, 2019).

4.2.6. Trimble RTX.

Trimble RTX es una tecnología GNSS global que proporciona posicionamiento a nivel de centímetros, en todo el mundo, en cualquier momento. Esta aplicación permite cargar datos de observación GNSS al servicio de procesamiento posterior CenterPoint RTX y recibir cálculos de posicionamiento. Los cálculos de posicionamiento se realizan en la época de observación (época actual) de ITRF2008 para conjuntos de datos recopilados antes del 23 de marzo de 2017, e ITRF2014 para conjuntos de datos recopilados a partir del 23 de marzo de 2017. La transformación se puede realizar seleccionando una diferente sistema de coordenadas y placa tectónica. Completando el siguiente formulario para recibir sus cálculos por correo electrónico, ver figura 4.8. (Trimble, 2019)

BIENVENIDO A TRIMBLE CENTERPOINT RTX SERVICIO POST-PROCESAMIENTO

Trimble RTX © es una tecnología GNSS global que proporciona posicionamiento a nivel de centímetros, en todo el mundo, en cualquier momento.

Esta aplicación le permite cargar datos de observación GNSS al servicio de procesamiento posterior CenterPoint RTX y recibir cálculos de posicionamiento. Los cálculos de posicionamiento se realizan en la época de observación (época actual) de ITRF2008 para conjuntos de datos recopilados antes del 23 de marzo de 2017, e ITRF2014 para conjuntos de datos recopilados a partir del 23 de marzo de 2017. La transformación se puede realizar seleccionando una diferente sistema de coordenadas y placa tectónica. Complete el siguiente formulario para recibir sus cálculos por correo electrónico.

1. Seleccione un sistema de coordenadas y placa tectónica:

Sistema coordinado: ITRF2014 ▼

Placa tectónica: (Detección automática) ▼

2. Seleccione un archivo para cargar:

Selecionar archivo bogt1840.19o

Figura 4.8: Formulario del servicio PPP online Trimble RTX.

Fuente: Tomado de (Trimble, 2019)

4.2.7. Online Positioning User Service (OPUS).

El Servicio de posicionamiento en línea (OPUS) de NOAA proporciona acceso gratuito a las coordenadas del Sistema Nacional de Referencia Espacial (NSRS) de alta precisión . OPUS utiliza un software que calcula las coordenadas utilizando la Red NOAA CORS (NCN). Para usar OPUS, simplemente se carga un archivo de datos GNSS en la página de carga OPUS. Los cálculos de la posición de NSRS son enviados por correo electrónico. Aunque también puede compartir públicamente en el sitio web de NGS. De acuerdo con lo expuesto en (NGS, 2019), se pueden describir las siguientes características:

- Procesamiento de datos doble frecuencia L1 y L2.
- Recibe archivo en formato RINEX y Hatanaka.

- Configuración del tipo de antena.
- Especificar la altura de antena.
- Soluciones para mediciones en modo estático y rápido estático.
- Permite compartir la solución públicamente.

The image shows a screenshot of the NGS website. At the top, there is a dark grey banner with the text "NGS Product Update". Below this, a light blue box contains the following text: "NGS has started to release its NOAA CORS Network ITRF2014 epoch 2010.00 coordinates, referred to as the Multi-Year CORS Solution 2 (MYCS2). The MYCS2 NAD 83 (2011) epoch 2010.00 coordinates are now available in NGS Datasheets and related products such as Data Explorer, DSWorld, and shapefiles. OPUS will soon be upgraded to use these new CORS coordinates and GEOID18. [Read more](#)". To the right of this text is a large black circle with a white lowercase letter 'i' inside, representing an information icon. Below the banner, there is a section titled "Ongoing Beta Releases:" with two bullet points: "▪ BETA GEOID 18" and "▪ BETA CORS ITRF Coordinates".

Below the banner, the main form for the OPUS service is visible. It starts with the heading "Upload your data file." followed by the text "Solve your GPS position & tie it to the National Spatial Reference System." and "What is OPUS? [FAQs](#)". There is a file selection button labeled "Seleccionar archivo" with the filename "bogt1840.19o" next to it. Below this is a note: "* **data file** of dual-frequency GPS observations. [sample](#)".

There is a dropdown menu currently showing "NONE". Below it, there is a text input field for "antenna" with the value "0.0610" and the text "meters above your mark." next to it. Below this is a note: "**antenna height** of your antenna's reference point."

At the bottom of the form, there is an email address input field containing "jalexorduna@gmail.com". Below it is a note: "* **email address** - your solution will be sent here. [Privacy Act Statement](#)".

On the right side of the form, there is a small thumbnail image of a data file and the text "sample solutions".

Figura 4.9: Formulario del servicio PPP online OPUS.
Fuente: Tomado de (NGS, 2019)

4.2.8. GPS data processing service provided by Geoscience Australia (AUSPOS).

AUSPOS es un servicio gratuito de procesamiento de datos GPS en línea desarrollado por Geoscience Australia. El cual aprovecha la red de estaciones IGS y la gama de productos IGS. AUSPOS trabaja con datos recopilados en cualquier lugar de la Tierra. Se pueden enviar datos RINEX GPS doble frecuencia de calidad geodésica observados en modo estático. Una vez se han cargado los datos, se recibe un informe de AUSPOS por correo electrónico con las coordenadas Geocentric Datum of Australia 2020 (GDA2020), Geocentric Datum of Australia 1994 (GDA94) y International Terrestrial Reference Frame (ITRF). En la figura 4.10, se observa en formulario para enviar los datos a este servicio. (Geoscience Australia, 2019). A continuación se presentan algunas características y consideraciones para utilizar el servicio de AUSPOS:

- Los archivos GPS RINEX deben contener más de una hora (preferiblemente dos) de datos de observación GPS.
- Los archivos GPS RINEX no deben tener algún dato del día actual.
- Los archivos GPS RINEX deben ser de máximo siete días de datos.
- Los nombres de los archivos GPS RINEX no deben tener espacios, ni caracteres especiales.
- La altura de la antena proporcionada es la distancia vertical desde la marca de tierra hasta el punto de referencia de la antena (ARP).

Home > Earth Monitoring and Reference Systems > Geodesy and Global Navigation Systems > AUSPOS - Online GPS Processing >

Number of RINEX files	1	Submit RINEX using	<input checked="" type="radio"/> upload <input type="radio"/> ftp
File Name	Seleccionar archivo bogt1840.19o	Height (m)	0.0610
		Antenna Type	DEFAULT(NONE)
Your Email Address:	jalexorduna@gmail.com		

submit start over

Figura 4.10: Formulario del servicio PPP online AUSPOS.
Fuente: Tomado de (Geoscience Australia, 2019)

4.2.9. GEOLan DONOSTI SL.

Al igual que los demás servicios en línea que se han explicado hasta el momento, GEOLan presta un servicio gratuito para el procesamiento de datos PPP. Sin embargo sus autores manifiestan que esta aplicación aún se encuentra en desarrollo, por lo que se recomienda ser muy cautelosos con sus resultados. GEOLan permite procesar datos en modo cinemático. Una vez que se han cargado los ficheros de observación, el servicio genera un link para descargar los resultados. Esto se realiza dentro del mismo sitio web, de decir que a diferencia de los demás servicios la solución no llega a un correo electrónico. (GEOLan Donosti, 2002).

Figura 4.11: Formulario del servicio PPP online GEOLan.
Fuente: Tomado de (GEOLan Donosti, 2002)

4.3. Software para procesamiento absoluto de datos GNSS.

Continuando con la exploración de herramientas informáticas para el procesamiento PPP de datos GNSS, y como se puede apreciar en la figura 4.12, se presentan a continuación una descripción general de los software más representativos y potentes del mercado. A este grupo de programas lo llamaremos de ahora en adelante “PPP Offline”. Bajo esta denominación se pueden encontrar software científico y académico. Estos programas los ofrecen algunos fabricantes de equipos GNSS, instituciones y empresas dedicadas a la investigación y aplicación de la Geodesia Espacial.

Software científico: Cuando se procesan o trabajan redes de alta precisión, tanto para estudios geodésicos como geodinámicos, se recurre al software científico, donde se tienen en cuenta todos los factores que pueden modificar tanto los marcos de referencias como el procesamiento de los observables. Los programas científicos para cálculos GNSS más relevantes son: (Valero et al., 2019)

- BERNESE, Universidad de Berna.
- GAMIT-GLOBK, Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences (Massachusetts Institute of Technology).
- GIPSY-OASIS (Jet Propulsion Laboratory – NASA).

Estos software, como ítems diferenciados frente a un software comercial en el procesamiento, está el cálculo de las velocidades de estaciones, parámetros de rotación del polo, correcciones por cargas oceánicas y correcciones por mareas terrestres. (Valero et al., 2019)

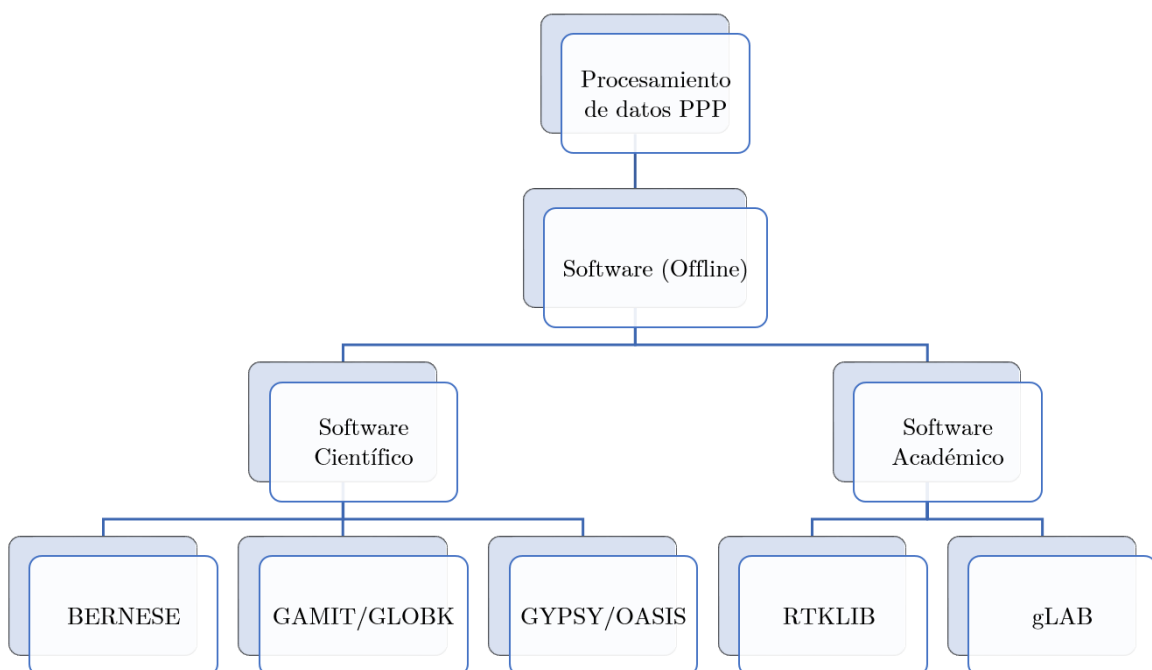


Figura 4.12: Software para posprocesos PPP Offline

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. BERNESE.

De acuerdo con lo expuesto en (Valero et al., 2019), el software GNSS de Bernese es un paquete de procesamiento de datos científico, de alta precisión y multi-GNSS desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB). El software GNSS de Bernese es una herramienta desarrollada con fines científicos que cumple con los más altos estándares de calidad para aplicaciones geodésicas y posteriores basadas en sistemas de navegación global por satélite GNSS. Tomando como referencia lo expuesto en (AIUB, 2019), a continuación se describen algunas de sus características:

- Disponible en plataformas Unix / Linux, Mac y Windows.
- Procesamiento paralelo multisesión para actividades de reprocesamiento.
- PPP (versiones básicas y avanzadas).
- Procesamiento de red de doble diferencia.
- Determinación de reloj.
- Determinación de órbita precisa LEO basada en datos GPS.
- Todos los ejemplos están diseñados para el procesamiento combinado de GPS/GLONASS.
- Programa para el análisis automatizado de series de tiempo de coordenadas.
- Resolución de ambigüedad para GPS y GLONASS.
- Manejo flexible de parámetros en el nivel de ecuación normal.
- Modelos modernos de troposfera (por ejemplo, VMF1, GMF/GPT).
- Modelado de ionosfera incluyendo correcciones de ionosfera de orden superior.
- Cumplimiento de las convenciones IGS e IERS 2010.
- Combinación de diferentes tipos de receptores y antenas.
- Capacidad de procesamiento de GALILEO.

Es un software que está disponible para dos tipos de clientes; la comunidad científica encaminada a la investigación por lo general son universidades y los clientes comerciales habitualmente son empresas o entidades públicas encargadas del mantenimiento de las redes geodésicas. Finalmente al tratarse de un software comercial, implica un costo adicional para los usuarios de datos GNSS. De acuerdo, con lo anterior, en el desarrollo de este TFM, no fue posible poner en práctica dicha herramienta.

4.3.2. GAMIT/GLOBK.

Conforme a lo expuesto por (GAMIT/GLOBK, 2019) y citado por (Valero et al., 2019), quien afirma que, GAMIT, GLOBK y TRACK forman un conjunto completo de programas para analizar las mediciones GNSS principalmente para estudiar la deformación de la corteza. El software ha sido desarrollado por MIT, Scripps Institution of Oceanography y Harvard University con el apoyo de la National Science Foundation.

GAMIT (GNSS at MIT) es una colección de programas para procesar datos de fase para estimar posiciones relativas tridimensionales de estaciones terrestres y órbitas satelitales, retrasos cenitales atmosféricos y parámetros de orientación de la Tierra. El software está diseñado para ejecutarse bajo cualquier sistema operativo UNIX.

GLOBK (Global Kalman filter) es un filtro de Kalman cuyo propósito principal es combinar varias soluciones geodésicas, como los experimentos con GPS, VLBI y SLR. Acepta como datos, o cuasi observaciones, las estimaciones y matrices de covarianza para las coordenadas de la estación, los parámetros de orientación de la Tierra, los parámetros orbitales y las posiciones de origen generadas a partir del análisis de las observaciones primarias. Las soluciones de entrada generalmente se realizan con incertidumbres a priori sueltas asignadas a todos los parámetros globales, de modo que las restricciones pueden aplicarse uniformemente en la solución combinada.

4.3.3. GIPSY-OASIS.

GIPSY-OASIS, es el paquete de software de simulación de análisis de órbita y sistema de posicionamiento inferido GNSS. GIPSY es desarrollado por el JPL, y mantenido por los grupos de Sistemas y Aplicaciones de Seguimiento Cercano a la Tierra. (GIPSY-OASIS, 2019)

Alguna características:

- Análisis de datos GNSS: GPS, GLONASS , DORIS, SLR.
- Posicionamiento y sincronización precisos a nivel de centímetro basados en GNSS: Plataformas espaciales, aviones, estaciones terrestres.
- La interfaz de usuario única de alto nivel admite la mayoría de las aplicaciones de posicionamiento preciso.
- Resolución de ambigüedad de receptor único utilizando los productos de reloj y órbita GPS de JPL.
- Documentación que acompaña a los módulos de software y ayuda en línea.
- Capacitación en clases anuales de grupos de usuarios de GIPSY y en línea.
- Cientos de usuarios de investigación y educación en más de 20 países.
- Se basa en más de 25 años de experiencia JPL con análisis de datos GPS.

Alguna aplicaciones:

- Posicionamiento terrestre para la investigación geofísica
- Estudios sobre la deformación de la tierra, tectónica de placas.
- Seguimiento de flujo de hielo.
- Estudios climáticos a través de la observación de la troposfera y la ionosfera.
- Marco de referencia y parámetros de rotación de la Tierra.

- Posicionamiento aeroespacial.
- Determinación de órbitas precisas.

4.3.4. RTKLIB.

RTKLIB es un paquete de programas de código abierto para posicionamiento estándar y preciso con GNSS. RTKLIB consta de una biblioteca de programas portátil y varios AP (Aplicaciones de Programas) que utilizan la biblioteca. Las características de RTKLIB según lo consultado en (RTKLIB, 2019) son las siguientes:

- Admite algoritmos de posicionamiento estándar y precisos con: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS , BeiDou y SBAS.
- Admite varios modos de posicionamiento con GNSS para procesamiento en tiempo real y posterior: DGNSS, Kinematic, Static, Moving-Baseline, Fixed, PPP-Kinematic, PPP-Staticand PPP-Fixe.
- Admite muchos formatos y protocolos estándar para GNSS: RINEX, BINEX , NTRIP, RTCA, NMEA SP3, ANTEX , IONEX, NGS PCV y EMS 2.0.
- Admite varios mensajes propietarios de receptores GNSS, archivo de registro local y ftp/http.
- Proporciona muchas funciones de biblioteca y API para el procesamiento de datos GNSS: Funciones de sistema de navegación y satélite, funciones de matriz y vector, funciones de tiempo y cadena, transformación de coordenadas, funciones de entrada y salida, funciones de rastreo de depuración, funciones dependientes de la plataforma, modelos de posicionamiento, modelos de atmósfera, modelos de antena, modelos de mareas terrestres, modelos de geoides, transformación de datos, funciones RINEX, efemérides y funciones de reloj, efemérides precisas y funciones de reloj, funciones de datos sin procesar del receptor, funciones RTCM, funciones de solución, convertidor KML de Google Earth, funciones SBAS, funciones de opciones, entrada de datos de flujo y funciones de salida, resolución de ambigüedad de enteros, posicionamiento estándar, posicionamiento preciso, posprocesamiento, funciones de servidor de flujo, funciones de servidor RTK, funciones de descarga.

4.3.5. (gLAB) GNSS-Lab Tool.

Tal como lo expone (GAGE, 2019), gLAB es un conjunto de herramientas de software desarrollado bajo un Contrato de la Agencia Espacial Europea (ESA) por el grupo de investigación de Astronomía y Geomática (gAGE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) , es un paquete educativo interactivo multipropósito para procesar y analizar datos GNSS.

gLAB realiza un modelado preciso de observables GNSS (pseudorange y fase portadora) a nivel de centímetro, lo que permite posicionamiento GPS autónomo y PPP. Cada contribuidor de error individual puede evaluarse de forma independiente, lo que, a su vez, proporciona un beneficio educativo importante. gLAB está adaptado a una variedad de formatos estándar como archivos RINEX, SP3, ANTEX y SINEX, entre

otros. Además, la funcionalidad también se incluye para GPS, GALILEO y GLONASS, lo que permite realizar algunos análisis con datos reales de múltiples constelaciones.

4.4. PPP en Tiempo Real.

El posicionamiento preciso de puntos PPP, se puede obtener en tiempo real si los productos de reloj y órbita satelital de referencia precisa están disponibles en tiempo real. Hay algunos proyectos en fase de desarrollo, tanto para productos en tiempo real como para PPP en tiempo real. Cabe señalar que todavía no se ha definido un estándar para PPP en tiempo real, pero el Comité Especial 104 de la Comisión Técnica de Radio para Servicios Marítimos (RTCM) está llevando a cabo un esfuerzo de estandarizar (Navipedia, 2019). Entre los proyectos en tiempo real, se destacan los siguientes;

4.4.1. IGS Real Time Pilot Project (IGS-RTPP).

El Proyecto piloto en tiempo real del Servicio internacional GNSS (IGS-RTPP) es un proyecto piloto del IGS. Este proyecto proporciona una oportunidad para que el IGS expanda y refine aún más su infraestructura existente en tiempo real y, una vez finalizado con éxito, potencialmente inicie un servicio oficial en tiempo real. El proyecto piloto reúne y distribuye datos y productos en tiempo real asociados con las constelaciones de satélites GNSS. Los principales productos previstos para el proyecto son los datos de observación de múltiples frecuencias, los relojes precisos y órbitas satelitales disponibles en tiempo real. El proyecto piloto se desarrolló por un período de 3 años (2007-2010). Los objetivos principales de IGS-RTPP del IGS incluyen:(International GNSS Service (IGS), 2007)

- Administrar y mantener una red global de seguimiento GNSS en tiempo real IGS.
- Generar productos combinados de análisis IGS en tiempo real.
- Desarrollar estándares y formatos para la recopilación y distribución de datos en tiempo real.
- Desarrollar estándares y formatos para la generación y distribución de productos de análisis en tiempo real.

4.4.2. Global Differential GPS (GDGPS).

El software JPL Real Time GIPSY (RTG) proporciona productos en tiempo real y también posicionamiento PPP en tiempo real. Para ello, se emplea la red de rastreo en tiempo real más grande del mundo, GDGPS rastrea las señales civiles GNSS en las frecuencias L1, L2 y L5. La cobertura satelital es redundante (25 veces para GPS, 18 veces para GLONASS, en promedio), lo que asegura una cobertura global sólida y sin interrupciones. Las mediciones sin procesar se transmiten a través de rutas de comunicación redundantes a tres GDGPS Operation Centers (GOC). En los GOC, los datos son procesados por el software, Real Time GIPSY (RTG), y de esta manera se logran las correcciones diferenciales en tiempo real de los estados de órbita y reloj del GNSS, así como otros subproductos y servicios. El enfoque para la determinación de la órbita, promovido por JPL, garantiza que todos los productos sean válidos de manera global y uniforme.(NASA's Jet Propulsion Laboratory, 2019b).

4.4.3. Real-Time System for Clock Estimation (RETICLE).

El Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), conocido como el centro de investigación nacional para aviación y vuelos espaciales de Alemania, a través de RETICLE ofrece flujos de datos en tiempo real a través del Networked Transport of RTCM vía Internet Protocol (NTRIP). El German Space Operations Center (GSOC) de DLR realiza rutinariamente una determinación precisa de órbita para sus misiones de órbita terrestre baja. Los requisitos para muchas misiones actuales y futuras requieren que la órbita del satélite se determine poco después del paso de la estación terrestre, porque esta información es necesaria para procesar aún más los datos de las cargas útiles del satélite. Las observaciones del receptor GPS del satélite están disponibles inmediatamente después del enlace descendente a la estación terrestre. El posicionamiento también requiere datos precisos de órbita y reloj para la constelación completa de GPS. Las predicciones y desviaciones del reloj, que se proporcionan, en la parte predicha de las órbitas ultrarrápidas IGS o las efemérides de emisión, se desvían rápidamente de los valores reales en varios decímetros o incluso metros. Esta desviación es causada por el ruido del reloj estocástico y las variaciones de frecuencia de los estándares de frecuencia atómica de los satélites GPS. Por lo tanto, los productos de órbita/reloj pronosticados con datos de varias horas son inutilizables para aplicaciones PPP, que requieren una precisión de posicionamiento basada en la fase portadora hasta el nivel del centímetro. La solución a este problema es el uso de compensaciones de reloj, que se han estimado a partir de mediciones GPS originadas en una red de estaciones de sensores. Por esta razón, RETICLE se ha desarrollado en el Centro de Operaciones Espaciales de DLR en Alemania. Los productos de órbita y reloj generados se utilizan para admitir la determinación de órbita del satélite Low Earth Orbit (LEO), los cuales se utilizarán en las próximas misiones espaciales, que requieren precisiones de determinación de órbita casi en tiempo real de hasta 8-10 cm. GSOC también participa en el IGS-RTP. (DLR, 2019).

4.5. PPP Regional.

Un servicio PPP es normalmente un servicio global, considerando que los productos de órbita y reloj son en sí mismos globales. Esto es cierto siempre que las estaciones de seguimiento utilizadas para el cálculo de los productos se distribuyan en todo el mundo. En este caso, hay una buena visibilidad de los satélites a lo largo de todas sus órbitas, y la precisión de las estimaciones de órbita y reloj no depende de la ubicación. Esto puede plantear algunas limitaciones, ya que existen principalmente dos opciones: (Navipedia, 2019)

1. Para desplegar una red global de estaciones, esto puede ser complejo y costoso de operar para un proveedor de servicios regional.
2. Para retransmitir en un proveedor externo de órbita y reloj, esto puede limitar la precisión, las capacidades en tiempo real y los enfoques multiconstelación.

Para superar este problema, el servicio PPP debe poder calcular sus propios productos de órbita y reloj utilizando una red regional de estaciones. En este caso, la precisión de las órbitas y los relojes está ligeramente degradada, pero esta degradación ocurre principalmente fuera del área donde se despliegan las estaciones. Dentro de esta región, la combinación de productos de órbita y reloj es tal que los rendimientos de posicionamiento son buenos. De hecho, es posible lograr desempeños de posicionamiento

al mismo nivel que con una red global. Esto abre posibilidades muy interesantes para las regiones que ya operan redes de receptores GNSS, ya que pueden implementar un servicio PPP utilizando sus propios recursos. Dicho servicio podría complementar RTK para áreas alejadas de cualquiera de las estaciones base que requieren muchas menos estaciones que un enfoque RTK clásico para el mismo nivel de precisión. Se ha observado que las soluciones PPP basadas en redes regionales, incluso para regiones pequeñas, son tan precisas como las soluciones PPP que utilizan redes globales. Esto abre nuevas formas de proporcionar servicios de posicionamiento precisos a nivel regional. (Navipedia, 2019)

Capítulo 5

Metodología.

En el presente capítulo y de acuerdo la figura (5.1), se describen las actividades realizadas y los procedimientos ejecutados para cumplir con el objetivo general del TFM. La primera sección corresponde a la revisión del estado del arte, para ello se ha realizado una búsqueda bibliográfica, en la cual se acudió a la revisión de artículos científicos, y a una lectura reflexiva y crítica.

En la segunda sección se explica y documenta lo relacionado con el procesamiento de los datos GNSS. En esta parte se realizó un ejercicio práctico, para lo cual se utilizaron tres metodologías. La primera se trata del software comercial Trimble Business Center (TBC) con el que se logran aplicar los conceptos de posicionamiento diferencial. La segunda herramienta corresponde a los servicios en línea, que son aquellas páginas de Internet que brindan el servicio gratuito PPP y la tercera se refiere al procesamiento realizado con los software académicos. Con los resultados obtenidos se realiza una comparación en términos de precisión y confiabilidad de las coordenadas de posicionamiento. Con estos cálculos se logra analizar cuál es la ventaja o desventaja de la técnica PPP frente al posicionamiento diferencial.

En la tercera y última sección, se realiza la documentación técnica de las secciones mencionadas anteriormente, para ello es necesario seguir las recomendaciones dadas por la dirección del Máster. Es así como este escrito se realizó en el lenguaje conocido como L^AT_EX.

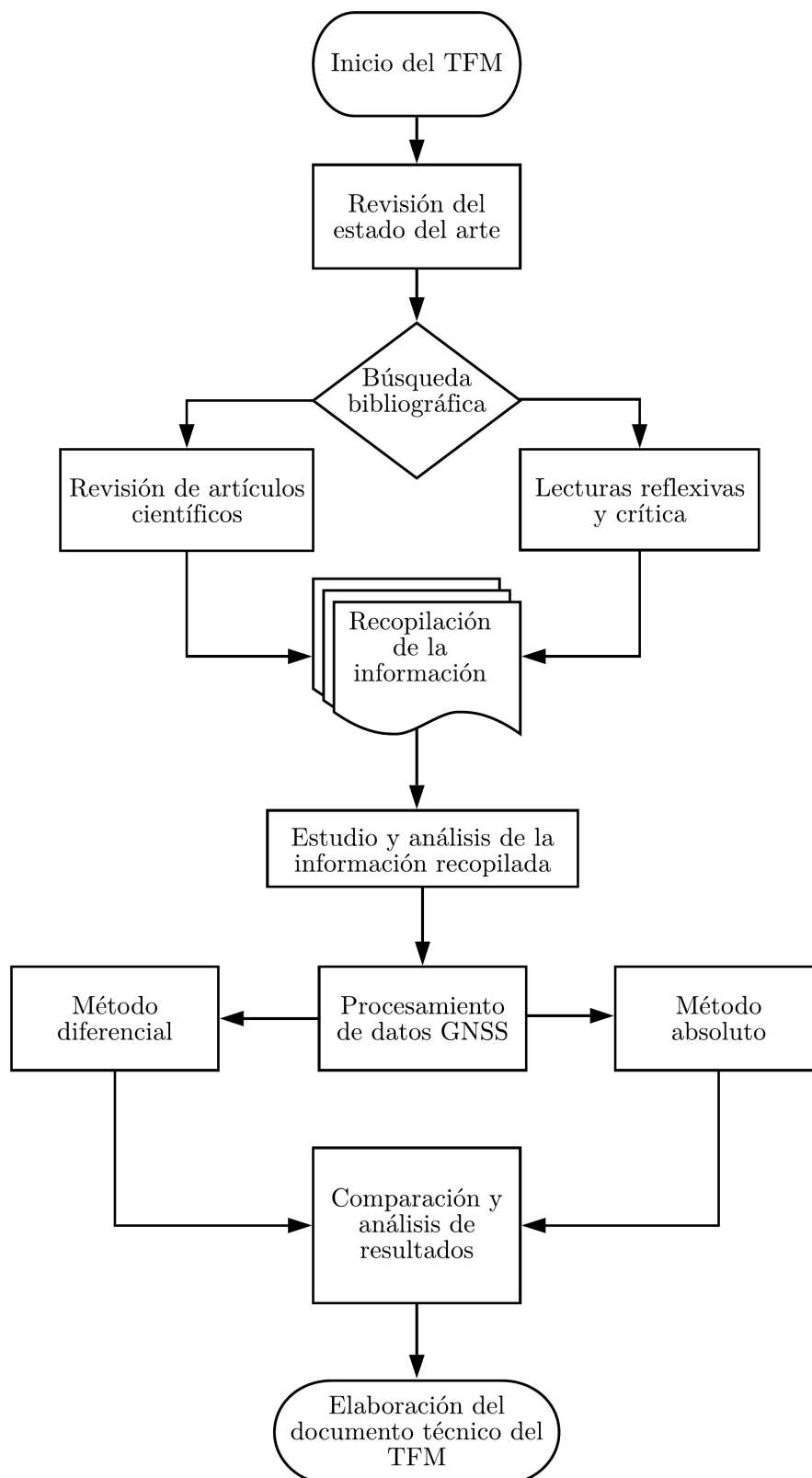


Figura 5.1: Diagrama de flujo de la metodología seguida en el TFM.
 Fuente: Elaboración propia.

5.1. Cronograma de Actividades.

En la figura (5.2), se observa el cronograma de actividades, que define el proceso a seguir y la dedicación de tiempo, esta figura, muestra de forma estructurada las diferentes actividades que se realizaron durante el desarrollo del TFM, e indica el orden secuencial y duración. De la misma manera incluye las fecha de inicio y final del trabajo realizado. La fecha inicial del proyecto fue el (13/01/2019) y la fecha final (13/09/2019), para una duración total de 243 días calendario.

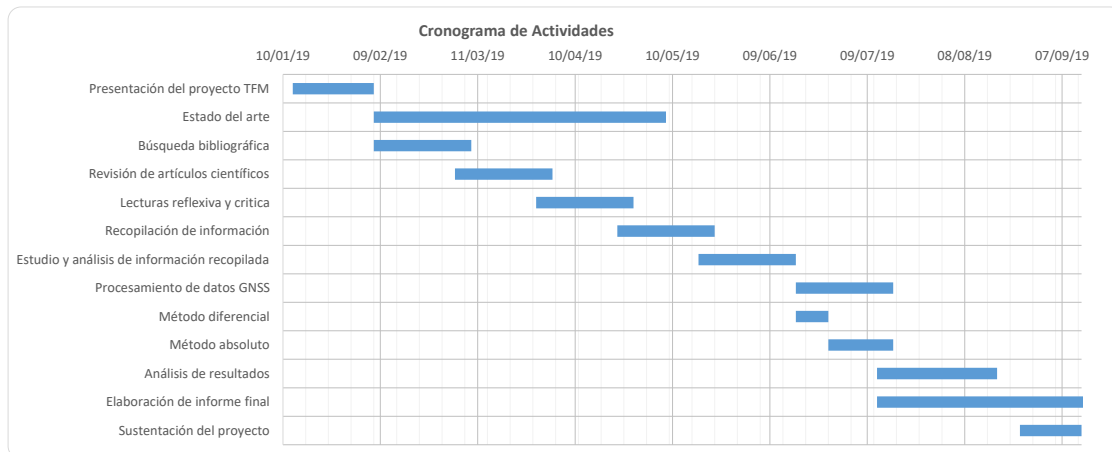


Figura 5.2: Cronograma de Actividades.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Revisión del estado del arte.

Para el desarrollo de este TFM, inicialmente se ha tomado como referencia el documento, de (Kouba et al., 2017), después de leerlo y analizarlo, se realizó la búsqueda de referencias bibliográficas relacionadas con el tema de estudio. Para ello se utilizaron, las siguientes fuentes:

Revisión de artículos científicos: Consistió en revisar de forma detallada los más importantes artículos científicos relacionados con el tema de interés en el campo de Precise Point Positioning (PPP), los cuales son publicados en las principales bases de datos de publicación científica como:

- Thomson Reuters
- Elsevier
- Proquest
- Web of Science
- Taylor & Francis Online
- Springer Link
- Scienci Direct

- IEEE Xplore
- Scopus, entre otras...

También se realizaron búsquedas en CIELO (servicio de préstamo bibliotecario de libros electrónicos que ofrece la Universidad de Salamanca) y en Google académico.

Lectura reflexiva y crítica: En esta fase se consultaron fuentes como; libros, revistas especializadas y demás documentos que plantean reflexiones y aportan a la comprensión de PPP.

Una de las mayores dificultades fue consolidar los documentos de referencia que dieran soporte al objeto de estudio. La razón obedece a que al buscar en las bases de datos de publicación científica mencionadas anteriormente, se debe plantear una estrategia que facilite el proceso de filtración de la información, ya que, en nuestro caso de estudio el tema de PPP es muy amplio y esta muy difundido. Por ejemplo al buscar solo por la palabra “PPP” puede arrojar mas de 1000 documentos. Razón por la cual se adopto la siguiente metodología

Establecer palabras claves: Para ello se ha sacado un listado de palabras claves, como se observa en la tabla (5.1).

Keywords
precise point positioning
final precise orbit
international GNSS service
kinematic mode
static mode
positioning
ionosphere-free
carrier phase
code pseudoranges
accurate satellite clock data
accurate orbital data
Zumberge
GPS
GNSS
PPP
RTK

Tabla 5.1: Lista de palabras claves Fuente: Elaboración propia.

Establecer conectores: Se usaron distintos conectores (And, Or, Not) de búsqueda para reducirla cantidad de artículos útiles que nos pueden servir para nuestra investigación, teniendo en cuenta la cantidad de artículos que aparecen, el año de publicación y la información allí contenida

Con las palabras anteriores se propone una búsqueda general de cada termino para saber a profundidad el significado de una de las mismas. Ya que el tema de investigación es la agrupación y la interacción entre cada uno de los términos, se plantea hacer una búsqueda de artículos científicos agrupando y conectado dos o más términos clave, con el fin de tener información acertada, sobre la problemática que buscamos solucionar. A continuación y se ilustra un ejemplo de la combinación de palabras y el uso de conectores en la base de datos conocida como *Web of Science*

- Consulta No1: con la palabra clave **precise point positioning**, arrojó 739 resultados
- Consulta No2: Con la combinación de **precise point positioning** and **final precise orbit**, la búsqueda se redujo a 42 resultados
- Consulta No3: Con la combinación de **precise point positioning** and **final precise orbit** and **international GNSS service** , la búsqueda se reduce a 3 resultados

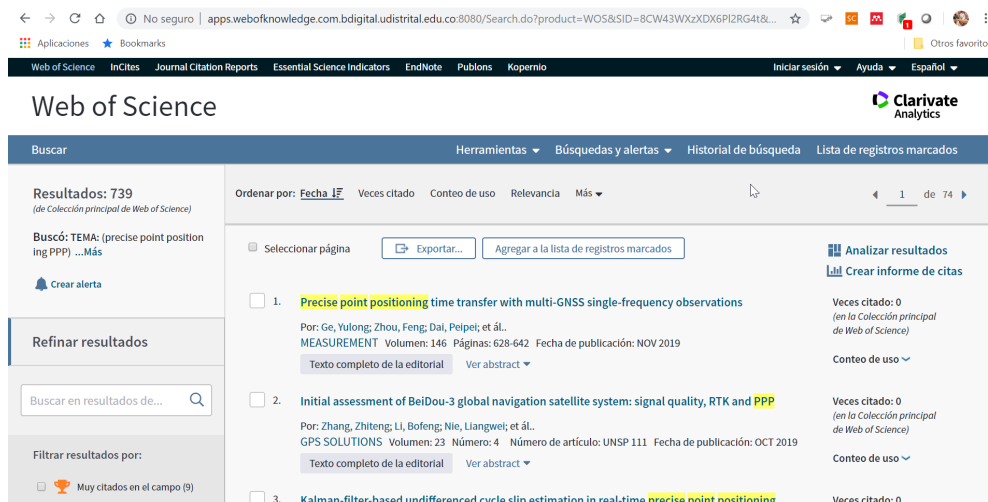


Figura 5.3: Consulta No1 en Web of Science.
Fuente: Elaboración propia.

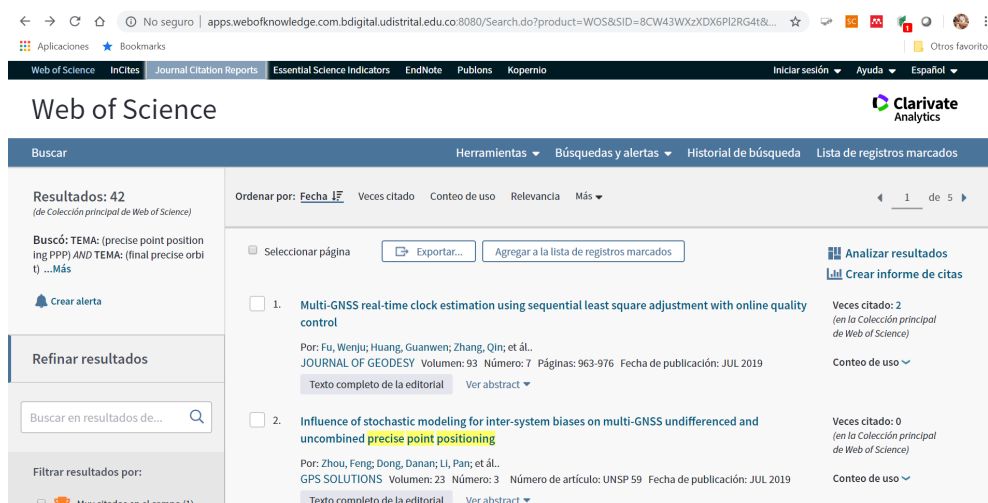


Figura 5.4: Consulta No2 en Web of Science.
Fuente: Elaboración propia.

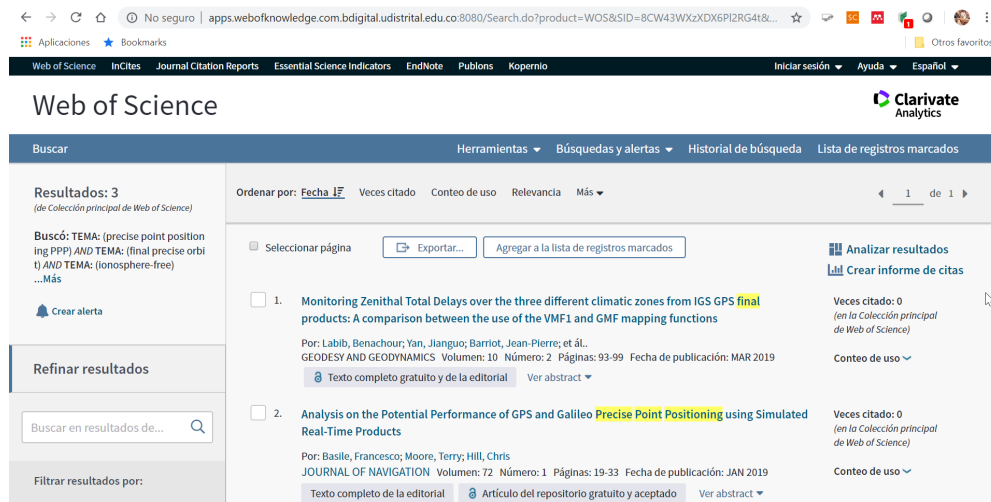


Figura 5.5: Consulta No3 en Web of Science.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de la revisión bibliográfica, se procedió recopilar la información relacionada con el objeto de estudio y lograr así consolidar el estado del arte, establecer la fundamentación teórica y ordenar sistemáticamente las ideas dentro de la cual se enmarca la investigación.

Enseguida se procedió al estudio y análisis de la información recopilada, con el propósito de conocer el estado del conocimiento, los enfoques, las teorías, los modelos existentes, así como documentar la importancia del trabajo a realizar. También permitió identificar quién o quienes son los autores mas importantes y por último observar cuales son las antecedentes, desarrollos actuales y tendencias futuras del posicionamiento PPP.

En total se tomaron 40 fuentes de información, relacionados de forma directa con el tema del TFM. Es importante considerar que estos fueron los que se dejaron descargar, ya existen artículos que para acceder a ellos se debe realizar un pago previamente. Estos textos pueden ser agrupados de acuerdo con sus características, en la siguientes categorías;

- Conceptos teóricos y modelos matemáticos de PPP
- Aplicaciones y procesamientos de PPP
- Desarrollos y tendencias futuras de PPP

Los textos de “*Conceptos teóricos y modelos matemáticos de PPP*”, cuentan con exponentes como: (Zumberge et al., 1997), (Witchayangkoon, 2000), (Hofmann-Wellenhof et al., 2011), (Berné et al., 2014), (Leick et al., 2015), (Capilla Romá, 2015), (Kouba et al., 2017), y (Valero et al., 2019); se caracterizan por explicar los modelos matemáticos de PPP. En estos se muestra cómo el modelo varia entre los diferentes autores, aunque en esencia todos parten del principio de la medición de los observables de pseudodistancia y medidas de fase, se presentan algunas diferencia sobre todo, en lo relacionado a los errores que acompañan el modelo PPP.

Los textos de “*Aplicaciones y procesamientos de PPP*”, se caracterizan por tener como eje central el uso de una herramienta para el procesamiento PPP, vale la pena resaltar los artículos de (Soycan, 2012) (Leandro et al., 2006b), y (Alban et al., 2016). Así por ejemplo (Soycan, 2012) hace una evaluación de calidad de posicionamiento preciso de puntos dentro del software de GPS Bernese, (Leandro et al., 2006b), presenta un análisis de datos GNSS en software GAPS para el procesamiento de posicionamiento preciso de puntos, mientras que (Alban et al., 2016), explica el cálculo de coordenadas usando el método PPP estático mediante el software libre RTKLIB.

Los textos de “*Desarrollos y tendencias futuras*”, se caracterizan por resaltar la importancia de explicar las condiciones actuales del PPP, sus ventajas y desventajas y sobre todo lo relacionado con las propuestas de eliminación o reducción de errores propios del sistema. Sobresalen artículos como el de (Fernández Plazaola, 2003), quien plantea las técnicas de resolución de la ambigüedad de las medidas de fase en sistemas de navegación por satélite. Por otro lado (Héroux and Kouba, 2001), plantea los principios para el método de posicionamiento PPP con RTK. Nuevos modelos troposféricos e ionosféricos son planteados por (Drewes et al., 2016). Por ultimo, pero no menos importante en el documento de (Bisnath and Gao, 2009), expone de forma detallada el estado actual del sistema PPP.

Entre todos los documentos consultados, vale la pena resaltar el artículo de (Zumberge et al., 1997) dónde se habla del fundamento teórico y matemático de PPP, es citado por la mayoría de autores, convirtiéndose el autor de referencia por excelencia en el tema de PPP.

5.3. Ejercicio de Aplicación PPP.

Como se menciono en la figura (1.1) y en la figura (5.1), y de acuerdo a lo que señala (Berné et al., 2014), existen dos métodos de observación y posicionamiento. En la siguiente sección, se explican las actividades realizadas durante el procesamiento de datos GNSS utilizando metodologías mencionadas. Para ello, se han tomado los datos de cuatro estaciones CORS, de la red MAGNA, localizadas en el territorio colombiano, dichas estaciones pertenecen al Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). Los datos son del 03 de julio de 2019, el intervalo de grabación es 15 segundos, y el periodo de grabación es 24 horas.

De las cuatro estaciones CORS, tres cumplen el rol de puntos fijos; “IBAG, DORA, TUNA” para realizar el ajuste de la red GNSS y la cuarta estación; “BOGT” es a la que se le determinan las coordenadas. El objetivo finalmente es comparar el resultado del procesamiento diferencial con el posicionamiento absoluto. En ambos casos los resultados se analizaron y compararon con las coordenadas semanales de BOGT, las cuales son emitidas por los centros de procesamiento SIRGAS.

5.4. Procesamiento diferencial de datos GNSS.

A continuación, en la figura (5.6), se observa el diagrama de flujo para el cálculo y ajuste de la red GNSS utilizando el método diferencial. Enseguida se explican con detalle este procedimiento.

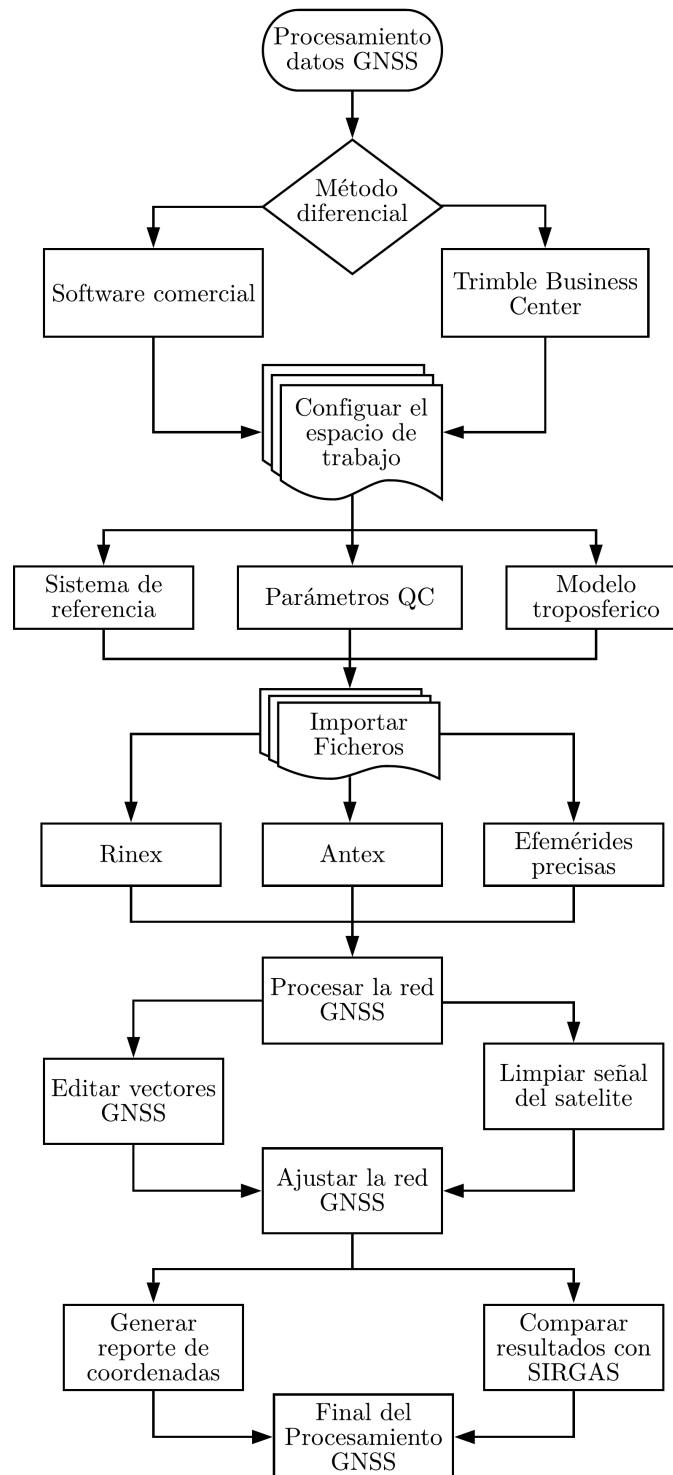


Figura 5.6: Diagrama de flujo para el procesamiento diferencial.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura (5.7), se refleja la localización y el diseño de red en general de las estaciones CORS que se han utilizado.

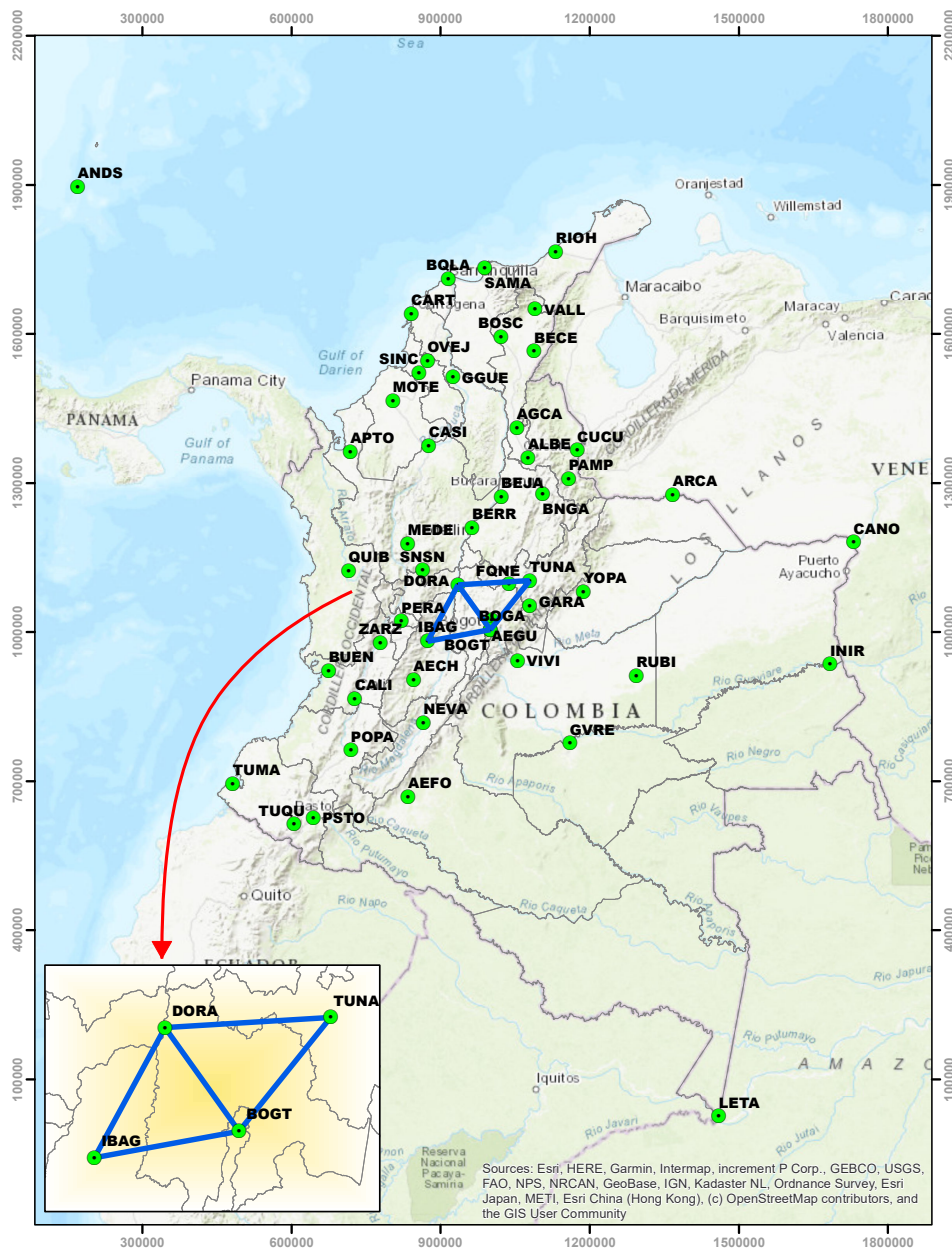


Figura 5.7: Estaciones CORS utilizadas y diseño de red.
Fuente: Elaboración propia.

5.4.1. Configuración del espacio de trabajo en el TBC.

Para el procesamiento de los datos GNSS, se utilizó la herramienta informática Trimble Business Center, versión 3.50. Este programa, permite importar los archivos Receiver INdependent EXchange (RINEX), descargar e importar los archivos de efemérides precisas y los ficheros de calibración de antenas, realizar el ajuste de la red GNSS y generar los reportes correspondientes. Para configurar el espacio de trabajo, se debe acceder al menú de *Project Settings*, tal como se muestra en la figura (5.8) y en este definir los parámetros indicados a continuación:

- Información de contacto del usuario
- Sistema de referencia: MAGNA SIRGAS
- Coordenadas Proyectadas: Gauss Kruger
- Elipsoide de referencia: WGS84
- Modelo Geoidal: Geocol 2004
- ITRF 2014
- Unidad de medida para distancia: metro
- Unidad de medida para ángulos: sistema sexagesimal
- Hora GPS
- Tolerancia de puntos: Calidad topográfica
- Tipo de efemérides: precisas
- Modelo tropoférico: Hopfield
- Uso de frecuencia: L1 y L2
- Precisión horizontal y vertical
- Máscara de elevación
- Tipo de solución
- Visualización de covarianza

The screenshot shows a 'Project Settings' dialog box with the 'Company Information' tab selected. The left sidebar lists various settings categories, with 'Company Information' highlighted. The main content area contains a table with the following data:

Company Information	
Name:	Universidad Salamnca
Address1:	Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquit
Address2:	TFM
City, State:	
Postal code:	
Country:	
Phone:	+57 3204921339
Fax:	
Web site:	
Email:	john.orduna@usal.es

Below the table, there is a 'Phone:' label and a text box containing the placeholder text 'The phone number of your company.' At the bottom right of the dialog, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 5.8: Configuración del espacio de trabajo en el TBC.
Fuente: Elaboración propia.

5.4.2. Importar ficheros.

Luego de configurar el espacio de trabajo, se procedió a realizar la importación de los ficheros; RINEX, ANTEX y Efemerides precisas

Ficheros RINEX.

Los archivos RINEX, utilizados están disponibles en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el cual como se observa en la figura (5.9) y bajo la política de datos abiertos mediante la URL (<ftp://geodesia.igac.gov.co/>), le permite al usuario descargar los ficheros que contienen los observables y datos de navegación. Los ficheros básicos de comprenden el formato RINEX son;

- Fichero de observación (O)
- Fichero de navegación GPS (N)
- Fichero de navegación GLONASS (G)



Figura 5.9: Dirección para la descarga del ficheros RINEX.
Fuente: Tomado de IGAC.

Como se menciona anteriormente, los datos corresponden al 03 de julio de 2019 y corresponde al día juliano 184, por lo tanto se debe acceder a este carpeta, tal como se indica en (5.10).

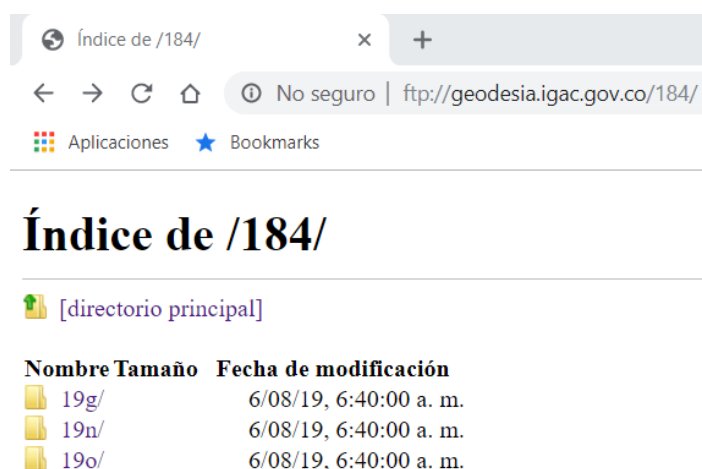


Figura 5.10: Descarga del ficheros RINEX dia juliano 184.
Fuente: Tomado de IGAC.

Fichero ANTEX

Las correcciones de fase de antena para distintos modelos de receptores están publicadas por el IGS, y vienen en red asociadas a los archivos ANTEX, los cuales se pueden descargar de los organismos: (Berné et al., 2014)

- <http://www.unavco.org>
- <http://igscb.jbl.nasa.gov>
- <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>

En nuestro caso de estudio se han descargado de la pagina de NGS, allí están disponibles los archivos completos de calibraciones de antena en formatos ANTEX (nuevo) y ANTINFO (legado de NGS). ver figura (5.11)

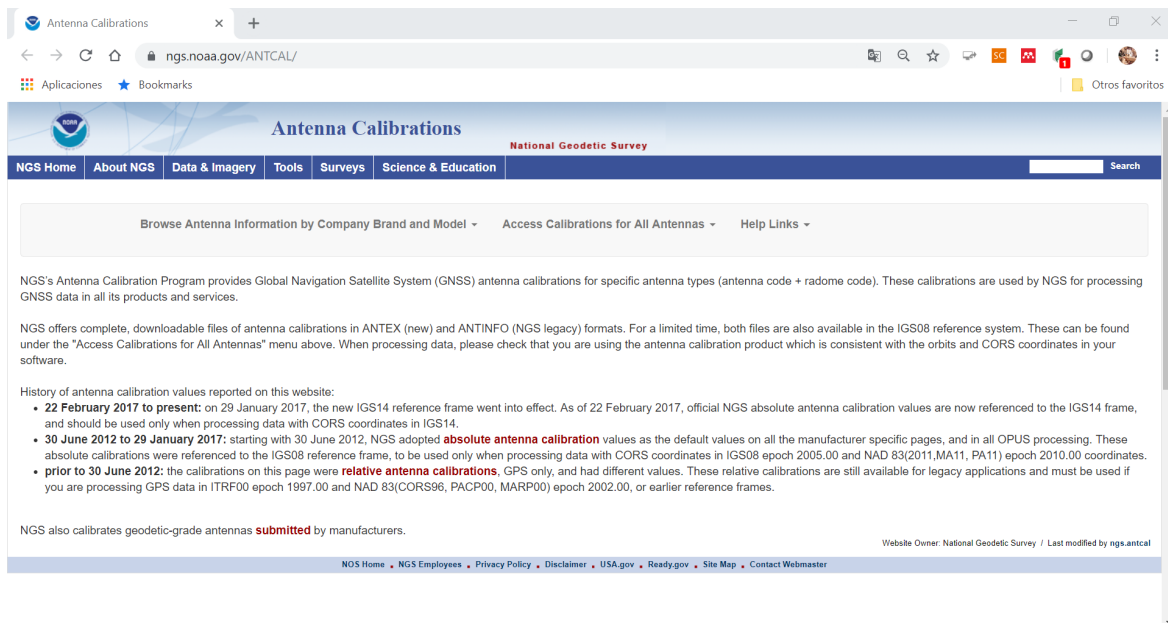


Figura 5.11: Descarga del ficheros ANTEX.

Fuente: Tomado de (National Geodetic Survey, 2019)

Ficheros de Efemérides precisas.

De acuerdo con la definición de (Berné et al., 2014), las efemérides precisas son determinaciones orbitales (X, Y, Z) de alta precisión realizadas por diferentes agencias o instituciones. Las efemérides precisas se transmiten en coordenadas tridimensionales y las efemérides transmitidas son parámetros para calcular luego las coordenadas. En el caso de las precisas se emplean los datos de pseudodistancias y fase registrados por estaciones permanentes diseminadas por todo el mundo, de diferentes instituciones o agencias. Los ficheros con las que las efemérides son puestas a disposición pública a través de Internet por medio del IGS, quien distribuye tres tipos de efemérides precisas: ultrarrápidas, rápidas y finales. Los resultados de las efemérides transmitidas están referidos al WGS84. Existen varios formatos pero el estándar es el formato de texto (sp3). Es importante tener presente los periodos de tiempo para la publicación de las efemérides precisas, así:

5.4.3. Procesar la red GNSS.

Una vez que se han descargado los ficheros mencionado anteriormente, se procede a importarlos en el TBC, luego se utiliza la herramienta de habilitar y/o deshabilitar vectores, para lograr obtener la geometría propuesta en el diseño de la red GNSS, tal como se expone en la figura (5.13). Una vez definida la geometría de la red que se desea procesar, se procede a realizar la edición de los vectores con el fin de analizar la información de cada satélite e inhabilitar el ruidosa o información discontinua que puede afectar la calidad del ajuste.

Para realizar este paso con el botón izquierdo del mouse picamos el vector que se quiere editar, este cambiara de tonalidad y seguidamente obturando el botón derecho se despliega una serie de opciones de las cuales se selecciona *Session Editor* para visualizar los satélites que recibieron la información de este vector y la calidad de esta, ver figura (5.14). Una vez depurada la información de este vector se activa la opción de aplicar modificaciones de tiempo y posteriormente se le da aceptar quedando este vector listo para ser procesado. Esta operación se deberá realizar con cada uno de los vectores de la sesión y posteriormente con cada una de las demás sesiones que conformes la red GNSS.

Una vez se obtengan datos de buena calidad se da click en *Save* y el vector quedara en color azul. Si los datos obtenidos están fuera de parámetros se deberá revisar los tiempos de sesión, la edición de la información o por ultimo cambia la máscara de elevación. No es recomendable subir demasiado esta mascara se podrá modificar máximo hasta 15 grados ya que a medida que se suba este rango la elevación del proyecto se distorsionara generando errores para la red GNSS, ver figura (5.15).

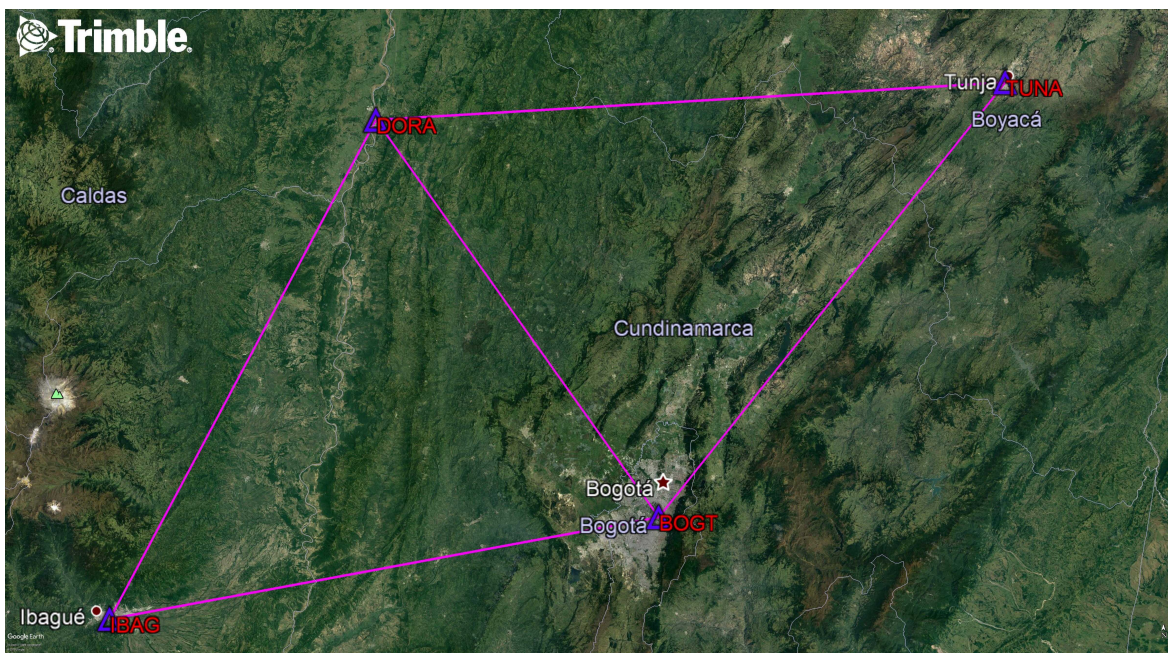


Figura 5.13: Diseño de la red GNSS.

Fuente: Elaboración propia.

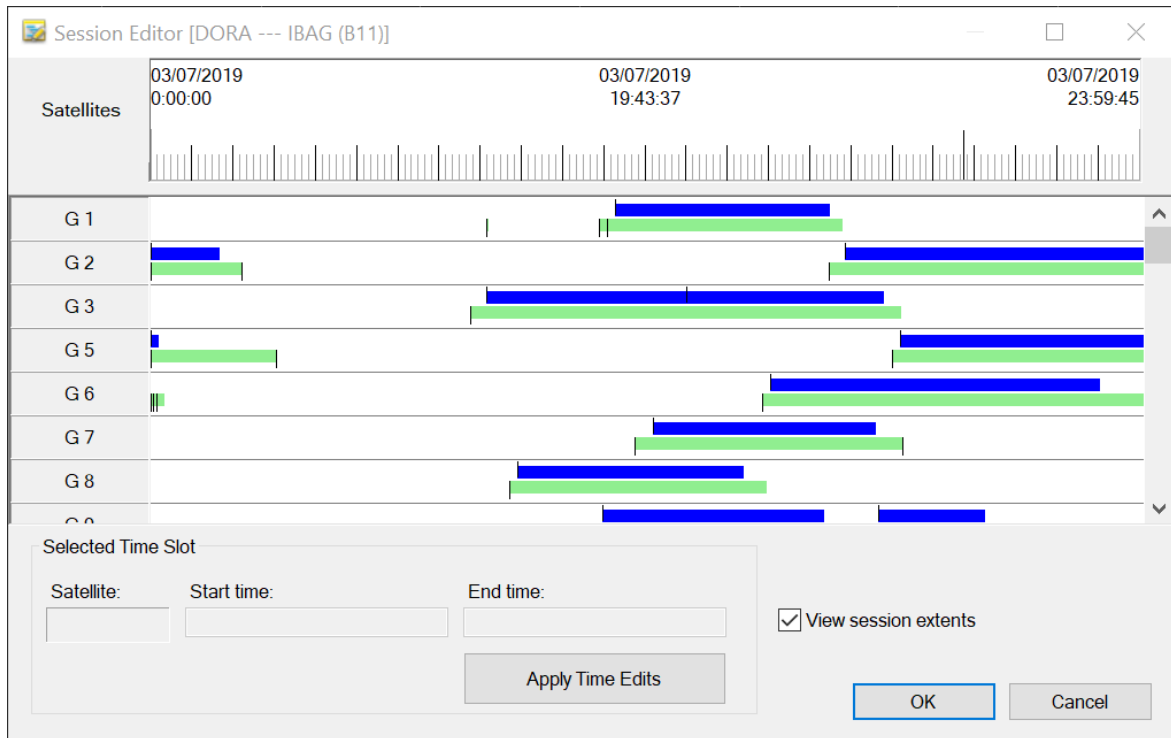


Figura 5.14: Edición de sesiones de la red GNSS.
Fuente: Elaboración propia. Adaptado de TBC

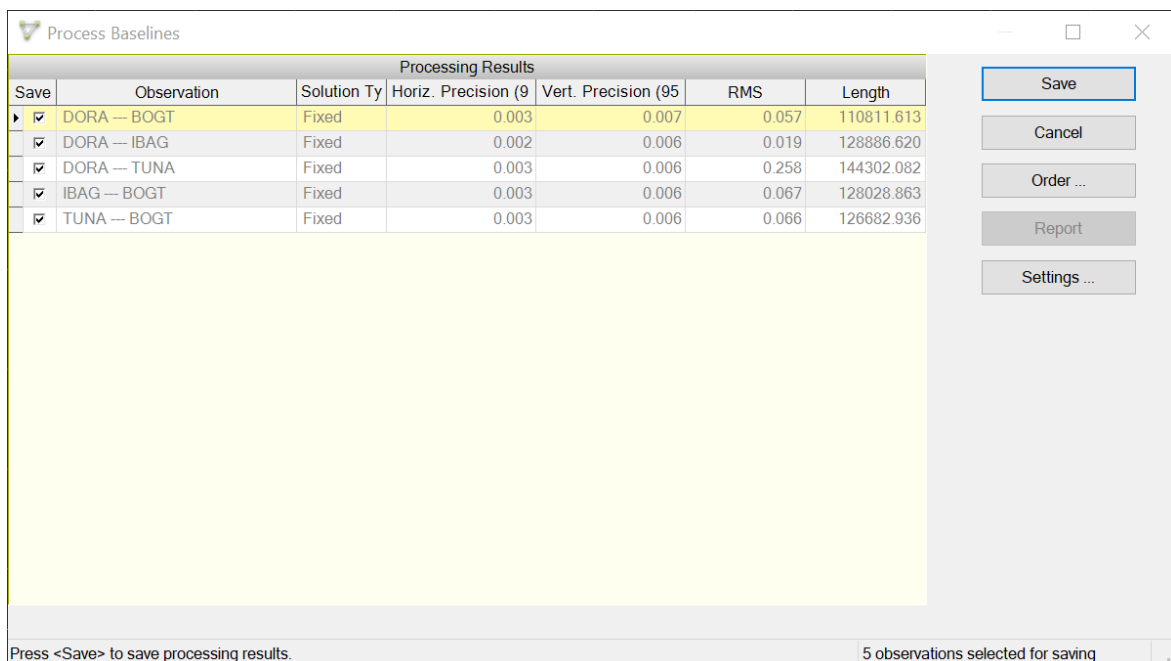


Figura 5.15: Resultado de procesamiento de los vectores.
Elaboración propia

5.4.4. Cálculo y ajuste de la red GNSS.

Para fijar las coordenadas para los puntos de control se seleccionaron los puntos a los que se le conocen las coordenadas (en nuestro caso IBAG, DOAR, y TUNA) se da click derecho y seleccionamos la opción *Add Coordinate* de allí se despliega una

ventana en donde se diligencian las coordenadas globales, para cada uno de los puntos de control.

Semana	Época	Combinación IBGE		Combinación IGS-RNAAC-SIR	
2061	2019-07-10 (2019.52)	ibg19P2061.crd	IBG2061S.SUM	sir19P2061.crd	SIR20617.SUM
2060	2019-07-03 (2019.50)	ibg19P2060.crd	IBG2060S.SUM	sir19P2060.crd	SIR20607.SUM
2059	2019-06-26 (2019.48)	ibg19P2059.crd	IBG2059S.SUM	sir19P2059.crd	SIR20597.SUM
2058	2019-06-19 (2019.46)	ibg19P2058.crd	IBG2058S.SUM	sir19P2058.crd	SIR20587.SUM

Figura 5.16: Coordenadas SIRGAS para la semana GPS 2061.
Fuente: Tomado de (SIRGAS, 2019)

Es de recordar que estas coordenadas están disponibles en la siguiente dirección de Internet (<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/coordinates/weekly-positions/>), ver figura (5.16). Las coordenadas de control se pueden observar en la tabla 5.2;

Estación	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Coordenada Z (m)
IBAG	1623166.64623	-6149837.63216	489244.38340
DORA	1679425.24986	-6123536.83179	602182.44941
TUNA	1818373.17443	-6085596.87892	610965.17209

Tabla 5.2: Coordenadas Geocéntricas de las estaciones CORS de apoyo.
Fuente: Elaboración propia.

Estas coordenadas, se publican semanalmente y son obtenidas de la combinación de las soluciones individuales proporcionadas por los Centros de Procesamiento SIRGAS. Dichas coordenadas se refieren al mismo marco de referencia utilizado para el cálculo de las órbitas satelitales, las correcciones a los relojes de los satélites, los parámetros de orientación terrestre y las correcciones a las variaciones de los centros de fase de las antenas GNSS transmisoras y receptoras. Estos marcos de referencia se conocen como marcos de referencia del IGS y corresponden a una selección de estaciones GNSS incluidas en el ITRF. Usualmente, después de publicarse una nueva solución del ITRF se genera una nueva actualización del marco de referencia del IGS y se garantiza que haya compatibilidad entre ambos marcos de referencia. (SIRGAS, 2019)

Finalmente en la figura (5.17), se observan los resultados del ajuste por método diferencial. La comparación y análisis respectivos frente a la técnica PPP, se muestran en el capítulo 6.

Adjusted ECEF Coordinates

Point ID	X (Meter)	X Error (Meter)	Y (Meter)	Y Error (Meter)	Z (Meter)	Z Error (Meter)	3D Error (Meter)	Constraint
BOGT	1744398.884	0.006	-6116037.038	0.021	512731.900	0.003	0.022	
DORA	1679425.250	?	-6123536.832	?	602182.449	?	?	LLh
IBAG	1623166.646	?	-6149837.632	?	489244.383	?	?	LLh
TUNA	1818373.174	?	-6085596.879	?	610965.172	?	?	LLh

Figura 5.17: Coordenadas de BOGT obtenidas mediante el procesamiento diferencial.
Fuente: Elaboración propia.

5.5. Procesamiento absoluto de datos GNSS.

A continuación, en la figuras (5.18) y (5.20), se observan los diagramas de flujo para el calculo de la estación (BOGT) utilizando el método absoluto con servicio en línea y software respectivamente. Enseguida se explican con detalle este procedimiento.

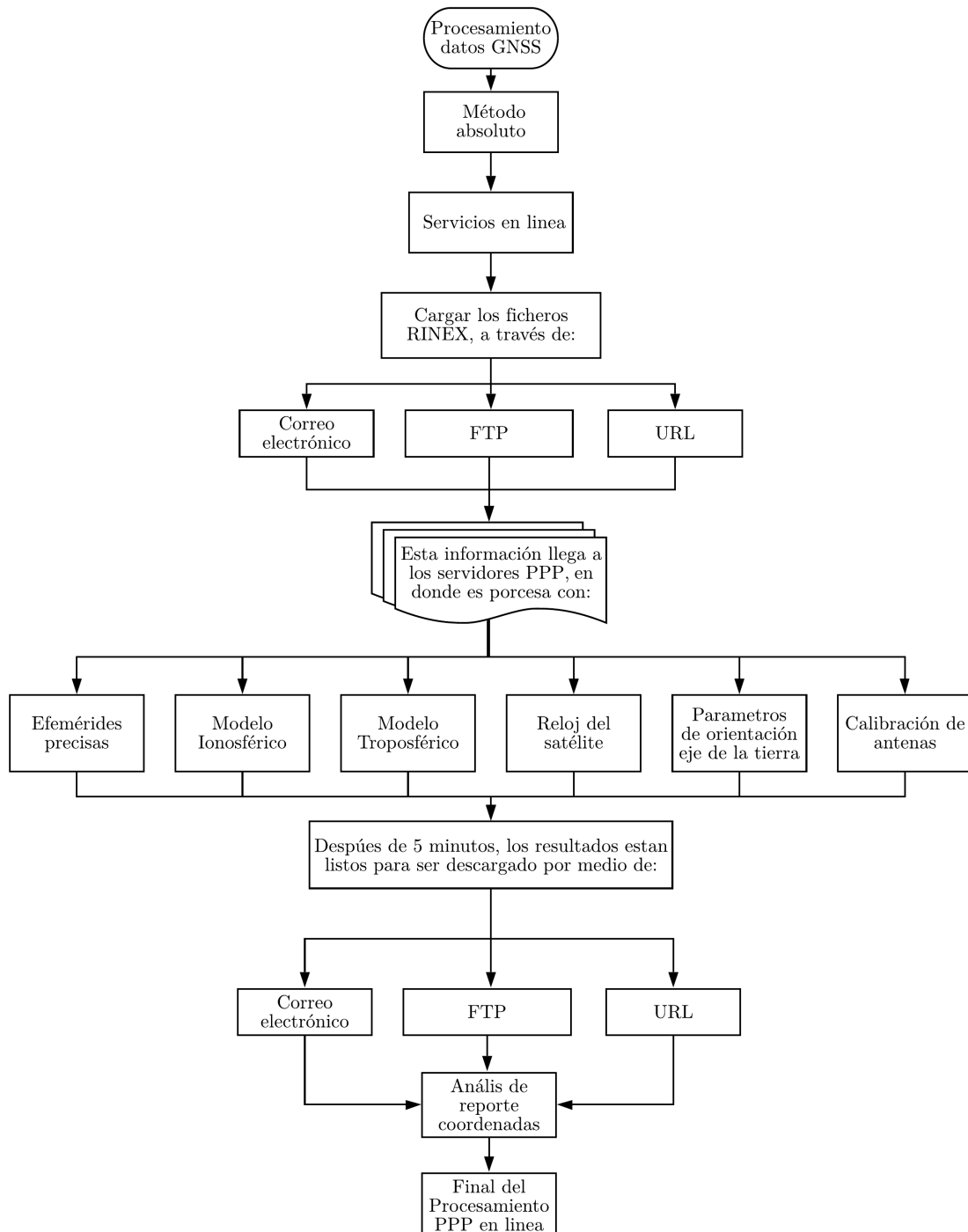


Figura 5.18: Diagrama de flujo para el procesamiento absoluto con servicios en línea. Fuente: Elaboración propia.

5.5.1. Procesamiento PPP utilizando servicios en línea.

Como se observa en la figura (4.12), un servicio en línea; es aquel que a través de Internet los usuarios envían a los centros de procesamiento los datos GNSS en formato RINEX y a vuelta de correo o por medio de un ftp reciben las coordenadas calculadas junto con información complementaria. Esto es posible gracias a que en el momento en que los datos GNSS son recibidos en el servidor, se procesan utilizando las órbitas GNSS y las correcciones del reloj de acuerdo con la información suministrada por el IGS. De la misma manera, los centros de procesamiento PPP ofrecen también servicios especializados para las correcciones adicionales como las de carga de mareas oceánicas, modelos de corrección troposférica e ionosférica, calibración de antena, etc. En la figura (5.19), se observa el esquema general para el procesamiento PPP a través de servicios en línea.

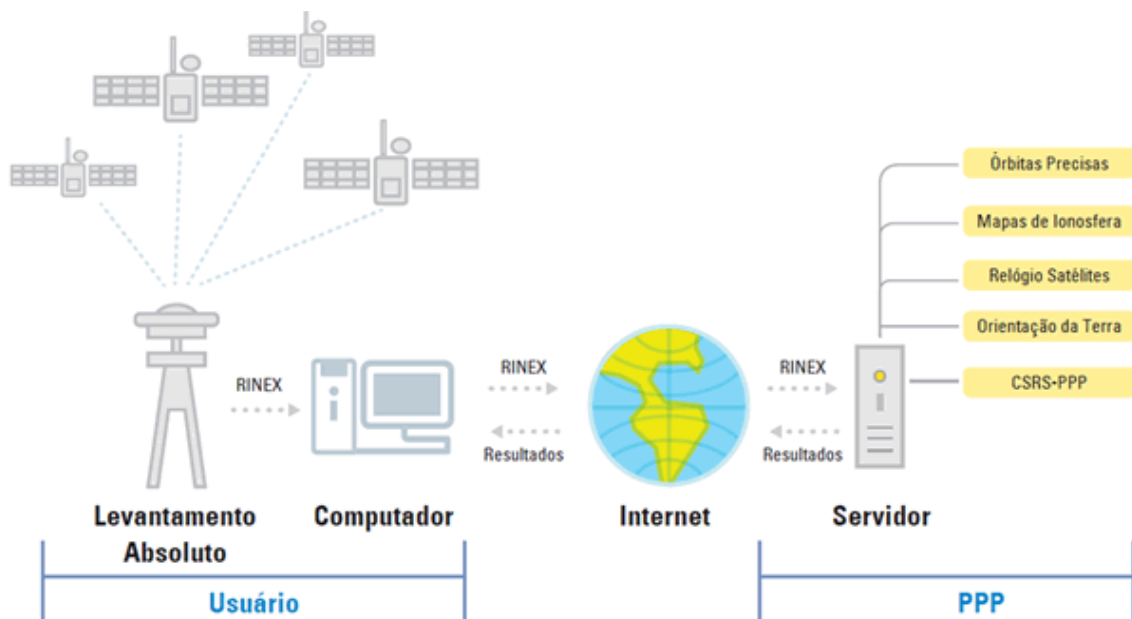


Figura 5.19: Esquema PPP para procesamiento por medio de servicios en línea.
Fuente: Tomado de (IBGE-PPP, 2019)

5.5.2. Procesamiento PPP utilizando Software.

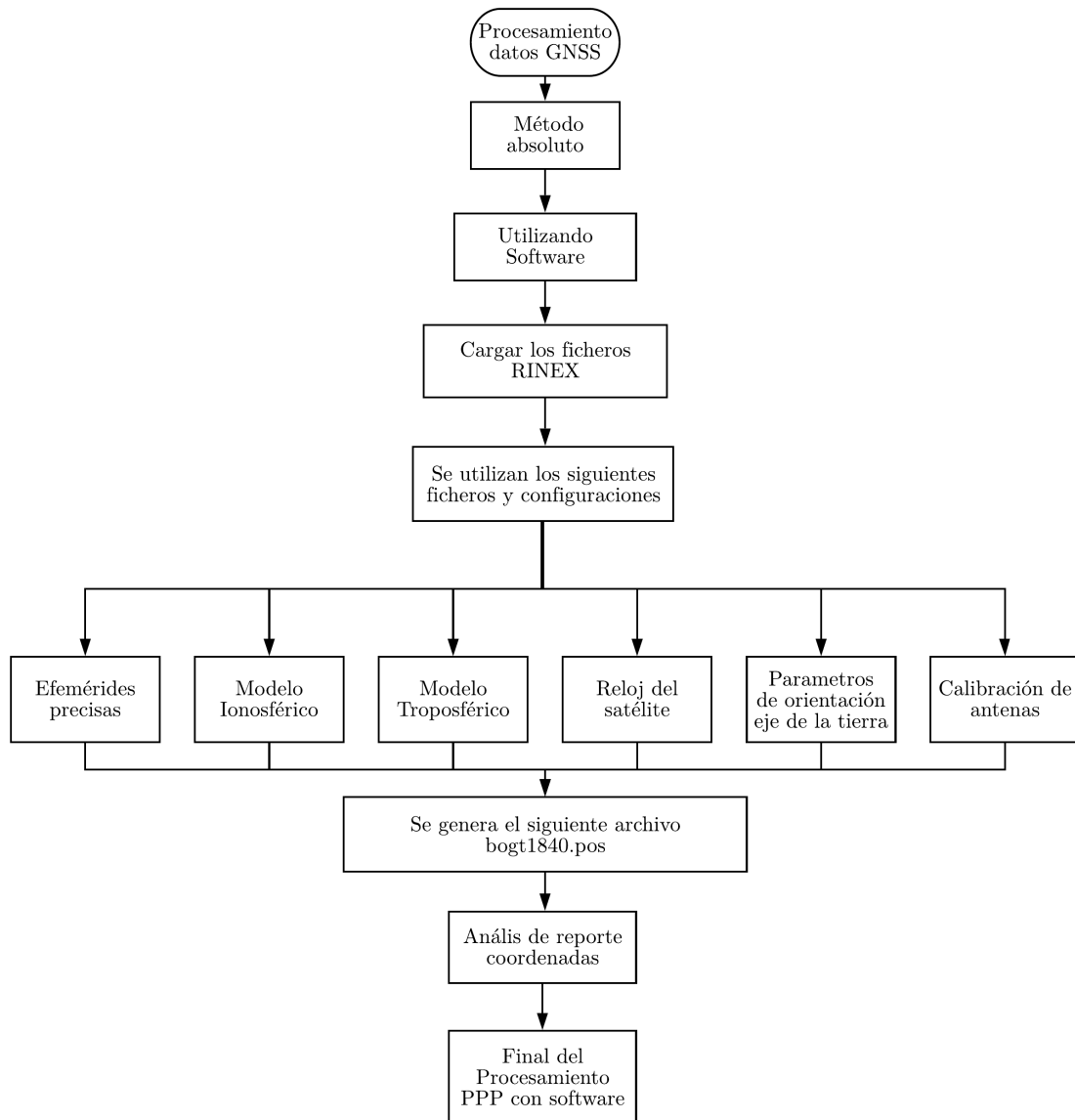


Figura 5.20: Diagrama de flujo para el procesamiento absoluto con software.
Fuente: Elaboración propia.

El primer software utilizado fue RTKLIB, el cual es un software académico de uso libre (Open Source), razón por la cual se ha facilitando procesamiento PPP de los datos GNSS. Para ello, se han tomado los mismos datos de las estaciones CORS, que se utilizaron en el procesamiento diferencial. Para poder procesar PPP, se deben configurar los siguientes parámetros, tal como se observa en las figuras (5.21) y (5.22).

- Fichero RINEX de observación (O).
- Archivo RINEX de navegación (N).
- Efemérides precisas finales (sp3).
- Fichero que contiene los valores del estado del reloj satélite. (clk 30s).

- Cargar el fichero de calibración de antenas (atx) .
- Configurar el modo de posicionamiento (PPP Static).
- Máscara de elevación.
- Modelo Ionosférico.
- Modelo Troposférico.

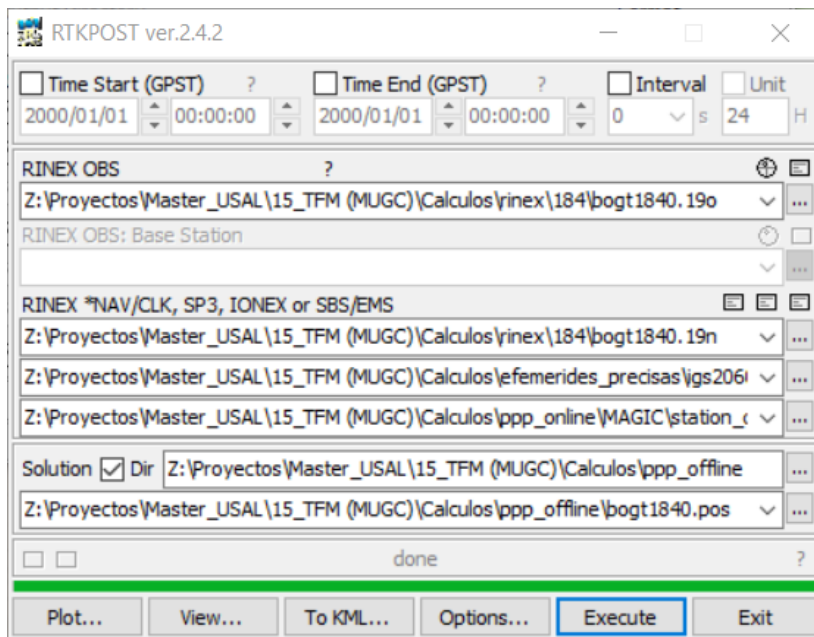


Figura 5.21: Archivos de entrada en el programa RTKLIB para posprocesado PPP
Fuente: Elaboración propia.

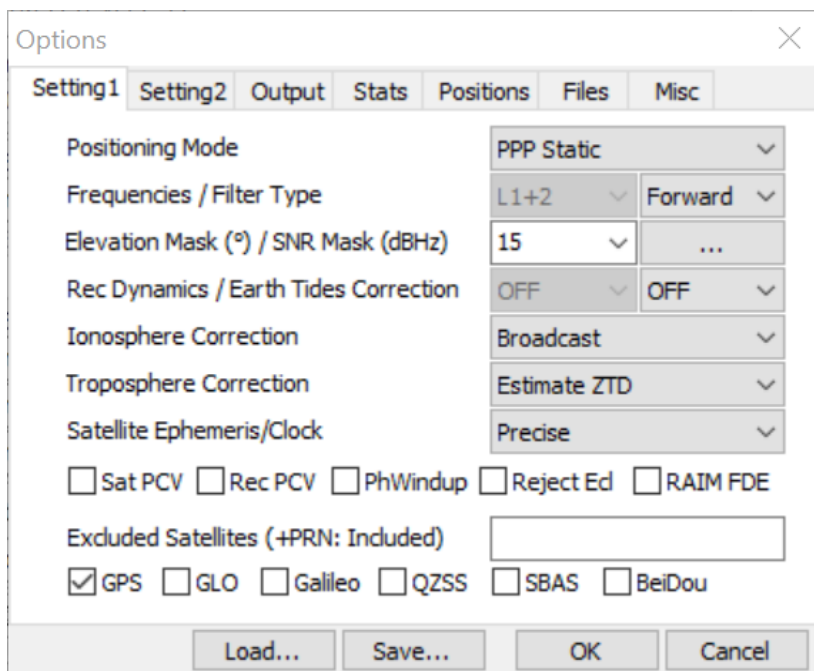


Figura 5.22: Configuración del software RTKLIB para posprocesado PPP
Fuente: Elaboración propia.

El segundo software utilizado fue gLAB, que se caracteriza por ser bastante flexible, capaz de ejecutarse bajo los sistemas operativos Linux, Windows y Mac, esto gracias a que la Oficina de Educación de ESA, proporciona licencias de forma gratuita a universidades y profesionales de GNSS. Para el procesamiento PPP, el programa solicita los mismos parámetros que RTKLIB, es así como en la figura (5.23), se observa la ventana principal del programa, y su configuración. Los parámetros de ajuste para el procesamiento PPP de datos GNSS son; Archivos RINEX, efemérides precisas finales, estado del reloj del satélite, calibración de antenas, etc.

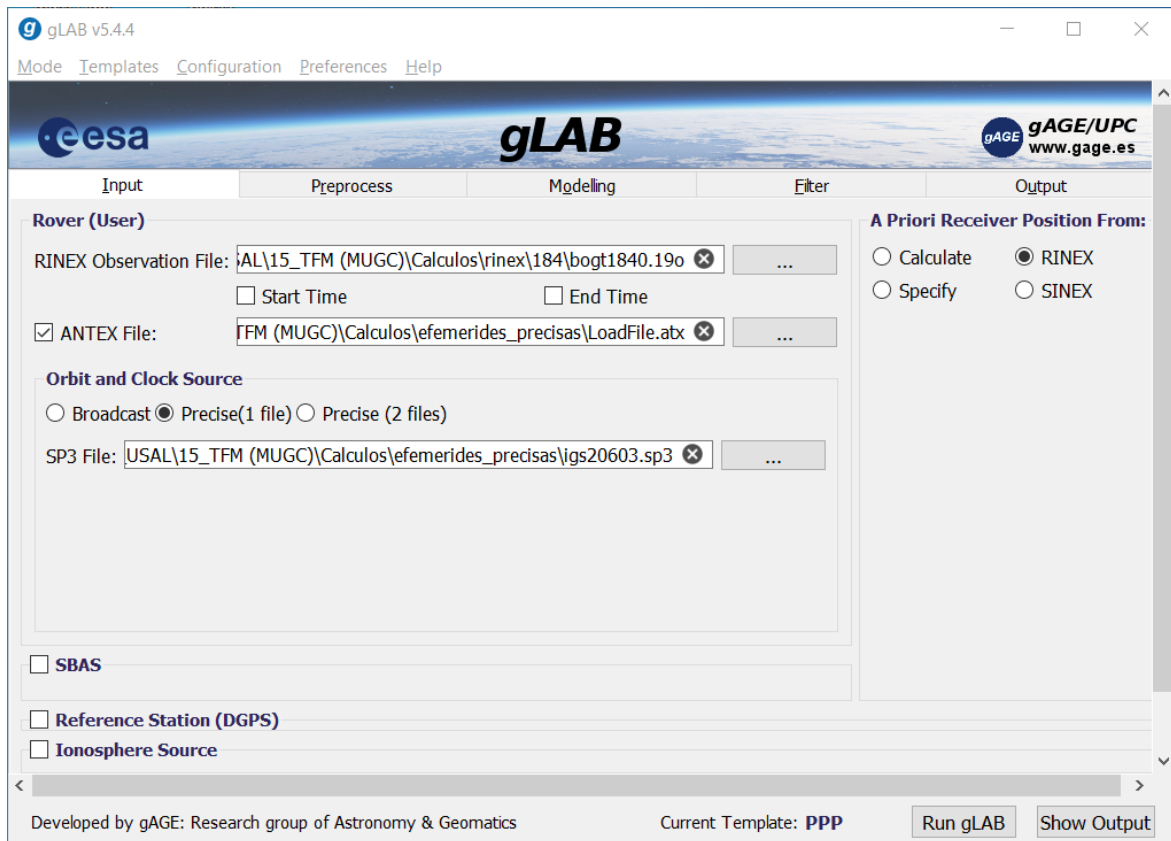


Figura 5.23: Configuración del software gLAB para posprocesado PPP
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6

Resultados.

En esta sección se presentan los resultados de ejercicio de aplicación PPP, realizado para el cálculo de datos GNSS. En la sección 5.3, se explica la metodología realizada, sin embargo, recordemos que se han tomado 4 estaciones CORS de la red MAGNA y se ha realizado el procesamiento diferencial y el absoluto, utilizando diferentes herramientas como software de escritorio, tanto comerciales como académicos y servicios en línea.

Antes de realizar los cálculos, y presentar los resultados parciales y finales, se debe tener en presente que la estación BOGT cuenta con las coordenadas geocéntricas certificadas por SIRGAS, tal como se observa en la tabla (6.1). Con respecto a estas coordenadas, son las de referencia, para comparar los resultados que se presentaran a continuación.

Servicio	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
SIRGAS	1744398.88032	-6116037.02636	512731.90014

Tabla 6.1: Coordenadas de BOGT certificadas certificadas por SIRGAS
Fuente: Elaboración propia.

6.1. Resultados parciales.

El primer proceso consistió en realizar el procesamiento diferencial, para lo cual se utilizó el software comercial TBC. Una vez realizado el cálculo y ajuste de la red se obtuvieron las siguientes coordenadas, ver tabla (6.2)

Software	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
TBC	1744398.88400	-6116037.03800	512731.90000

Tabla 6.2: Coordenadas de BOGT calculadas por el TBC
Fuente: Elaboración propia.

El segundo procesamiento de datos GNSS, fue el que se realizó utilizando los servicios en línea, para lo cual se usaron 9 sitios web. Los cuales se resumen en la tabla (6.3).

Servicio	Datum	Opciones	Transferencia	Resultados
APPS	Época de observación	Modo Estático y Cinemático	Upload en el sitio web Máximo de 10 MB.	Download del sitio web
CSRS-PPP	Época de observación	Modo Estático y Cinemático	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo en pdf
GAPS	Época de observación	Se puede hacer cargue de forma básica y avanzada	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo en pdf
IBGE	Época de observación ITRF2014	Modo Estático Altura y tipo y de antena	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo zip
Magic GNSS	ITRF2014	Modo Estático y Cinemático	Email con archivo RINEX	Email con coordenadas y archivo zip
Trimble RTK	Época de observación ITRF2014	Modo Estático y Cinemático	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo zip
OPUS	Época de observación	Modo Estático Altura y tipo y de antena	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo zip
AUSPOS	Época de observación	Deja cargar mas de un archivo RINEX. Altura y tipo y de antena	Upload en el sitio web	Email con coordenadas y archivo zip
GEOLand	Época de observación	Estático y Cinemático	Upload en el sitio web	Download del sitio web

Tabla 6.3: Resultados de los servicios PPP utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

Cada servicio PPP tiene su forma particular de cargar los datos y así mismo de generar los resultados. Por tal razón en la tabla (6.4) se presentan las coordenadas obtenidas de este proceso.

Servicio	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
APPS	1744398.87940	-6116037.01390	512731.90040
CSRS-PPP	1744398.88000	-6116037.02700	512731.90200
GAPS	1744398.87910	-6116037.02650	512731.90010
IBGE	1744398.87840	-6116037.03420	512731.90070
Magic GNSS	1744398.87530	-6116037.02780	512731.88700
Trimble RTK	1744398.88400	-6116037.03700	512731.90200
OPUS	1744398.90200	-6116037.02700	512731.89300
AUSPOS	1744398.88800	-6116037.02800	512731.90200
GEOLand	1744398.87530	-6116037.00080	512731.89850

Tabla 6.4: Coordenadas de BOGT calculadas por servicios PPP.
Fuente: Elaboración propia.

El tercer y último procedimiento se realizó utilizando software académico. Particularmente estamos hablando de RTKLIB y gLAB, ambos con licencia de distribución libre, es decir funcionan bajo la política de Open Source. Los resultados de este proceso se observan en la tabla (6.5).

Software	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
RTKLIB	1744398.91498	-6116037.18834	512731.92916
gLAB	1744399.03983	-6116037.55761	512731.75354

Tabla 6.5: Coordenadas de BOGT calculadas por software académico.
Fuente: Elaboración propia.

6.2. Resultados finales.

Con respecto a los resultados finales en la tabla 6.6 se observan, las coordenadas para la estación BOGT. En esta tabla están los valores tanto de las coordenadas certificadas por SIRGAS, como las generadas por el software comercial TBC, los servicios de procesamiento en línea y por último las generadas por el software académico. El objetivo es realizar la comparación de los resultados empleando diferentes herramientas y analizar cual metodología de las utilizadas es más precisa. En total contamos con 13 coordenadas.

No	Servicio/Software	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)
1	SIRGAS	1744398.88032	-6116037.02636	512731.90014
2	TBC	1744398.88400	-6116037.03800	512731.90000
3	APPS	1744398.87940	-6116037.01390	512731.90040
4	CSRS-PPP	1744398.88000	-6116037.02700	512731.90200
5	GAPS	1744398.87910	-6116037.02650	512731.90010
6	IBGE	1744398.87840	-6116037.03420	512731.90070
7	Magic GNSS	1744398.87530	-6116037.02780	512731.88700
8	Trimble RTK	1744398.88400	-6116037.03700	512731.90200
9	OPUS	1744398.90200	-6116037.02700	512731.89300
10	AUSPOS	1744398.88800	-6116037.02800	512731.90200
11	GEOLand	1744398.87530	-6116037.00080	512731.89850
12	RTKLIB	1744398.91498	-6116037.18834	512731.92916
13	gLAB	1744399.03983	-6116037.55761	512731.75354

Tabla 6.6: Coordenadas finales de todos los procesos realizados para BOGT
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6.7, se observan los resultados en metros, al comparar las coordenadas de la estación BOGT con los 12 resultados realizados.

No	Servicio/Software	Delta X	Delta Y	Delta Z
1	SIRGAS	0.000000	0.000000	0.000000
2	TBC	-0.003680	0.011640	0.000140
3	APPS	0.000920	-0.012460	-0.000260
4	CSRS-PPP	0.000320	0.000640	-0.001860
5	GAPS	0.001220	0.000140	0.000040
6	IBGE	0.001920	0.007840	-0.000560
7	Magic GNSS	0.005020	0.001440	0.013140
8	Trimble RTK	-0.003680	0.010640	-0.001860
9	OPUS	-0.021680	0.000640	0.007140
10	AUSPOS	-0.007680	0.001640	-0.001860
11	GEOLand	0.005020	-0.025560	0.001640
12	RTKLIB	-0.034656	0.161981	-0.029023
13	gLAB	-0.159514	0.531251	0.146604

Tabla 6.7: Diferencia de coordenadas entre SIRGAS y posproceso de BOGT
Fuente: Elaboración propia.

Para poder determinar, si el resultado que se obtuvo en cada procesamiento es consistente, se someten a continuación los datos al cálculo de la desviación estándar, utilizando la ecuación 6.1. Para ello, se hará por separado para cada coordenada, es decir coordenadas (X), (Y), (Z).

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{(n-1)}} \quad (6.1)$$

Donde:

- σ = Desviación estándar

- v^2 = error residual al cuadrado
- n = numero de observaciones

De acuerdo con lo anterior, en la tabla 6.8 se observa el cálculo del error residual y el error residual al cuadrado para la coordenada (X).

No	Servicio y/o Software	Coord. X (m)	Media	Error residual	Error residual al cuadrado
2	TBC	1744398.88032	1744398.88507	-0.004746	0.00002253
3	APPS	1744398.88400	1744398.88507	-0.001066	0.00000114
4	CSRS-PPP	1744398.87940	1744398.88507	-0.005666	0.00003211
5	GAPS	1744398.88000	1744398.88507	-0.005066	0.00002567
6	IBGE	1744398.87910	1744398.88507	-0.005966	0.00003560
7	Magic GNSS	1744398.87840	1744398.88507	-0.006666	0.00004444
8	Trimble RTK	1744398.87530	1744398.88507	-0.009766	0.00009538
9	OPUS	1744398.88400	1744398.88507	-0.001066	0.00000114
10	AUSPOS	1744398.90200	1744398.88507	0.016934	0.00028675
11	GEOLand	1744398.88800	1744398.88507	0.002934	0.00000861
12	RTKLIB	1744398.87530	1744398.88507	-0.009766	0.00009538
13	gLAB	1744398.91498	1744398.88507	0.029910	0.00089458
No de datos		12	Sumatoria	0.000000	0.00154332

Tabla 6.8: Cálculo error residual de la Coordenadas (X)

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6.9 se observa el cálculo del error residual y el error residual al cuadrado para la coordenada (Y).

No	Servicio y/o Software	Coord. Y (m)	Media	Error residual	Error residual al cuadrado
2	TBC	-6116037.02636	-6116037.03958	0.013215	0.00017464
3	APPS	-6116037.03800	-6116037.03958	0.001575	0.00000248
4	CSRS-PPP	-6116037.01390	-6116037.03958	0.025675	0.00065921
5	GAPS	-6116037.02700	-6116037.03958	0.012575	0.00015813
6	IBGE	-6116037.02650	-6116037.03958	0.013075	0.00017096
7	Magic GNSS	-6116037.03420	-6116037.03958	0.005375	0.00002889
8	Trimble RTK	-6116037.02780	-6116037.03958	0.011775	0.00013865
9	OPUS	-6116037.03700	-6116037.03958	0.002575	0.00000663
10	AUSPOS	-6116037.02700	-6116037.03958	0.012575	0.00015813
11	GEOLand	-6116037.02800	-6116037.03958	0.011575	0.00013398
12	RTKLIB	-6116037.00080	-6116037.03958	0.038775	0.00150350
13	gLAB	-6116037.18834	-6116037.03958	-0.148766	0.02213118
No de datos		Sumatoria	12	0.000000	0.02526639

Tabla 6.9: Cálculo error residual de la Coordenadas (Y)

Elaboración propia

Por último, en la tabla 6.10 se observan el cálculo del error residual y el error residual al cuadrado para la coordenada (Z).

No	Servicio y/o Software	Coord. Z (m)	Media	Error residual	Error residual al cuadrado
2	TBC	512731.90014	512731.90125	-0.001110	0.00000123
3	APPS	512731.90000	512731.90125	-0.001250	0.00000156
4	CSRS-PPP	512731.90040	512731.90125	-0.000850	0.00000072
5	GAPS	512731.90200	512731.90125	0.000750	0.00000056
6	IBGE	512731.90010	512731.90125	-0.001150	0.00000132
7	Magic GNSS	512731.90070	512731.90125	-0.000550	0.00000030
8	Trimble RTK	512731.88700	512731.90125	-0.014250	0.00020307
9	OPUS	512731.90200	512731.90125	0.000750	0.00000056
10	AUSPOS	512731.89300	512731.90125	-0.008250	0.00006807
11	GEOLand	512731.90200	512731.90125	0.000750	0.00000056
12	RTKLIB	512731.89850	512731.90125	-0.002750	0.00000756
13	gLAB	512731.92916	512731.90125	0.027913	0.00077914
No de datos		12	0.000000	0.00106467	

Tabla 6.10: Cálculo error residual de la Coordenadas (Z)
Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar los respectivos cálculo de la formula 6.1, se obtienen los valores de la desviación estándar, tal como se observa en la tabla (6.11).

Coordenada	Desviación estándar
X	0.04608
Y	0.15665
Z	0.04379

Tabla 6.11: Desviación estándar utilizando todos los procesamientos absoluto y diferencial.

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo datos de la figura (6.1), se puede determinar la probabilidad de error en cualquier porcentaje de probabilidad tal como se expresa en la ecuación (6.2):

$$E_p = C_p \sigma \quad (6.2)$$

Donde:

- E_p = es el porcentaje de error
- C_p = es el correspondiente factor numérico de acuerdo con la figura (6.1)

El error del 50 %, es llamado error probable. Este valor fija los limites dentro de los cuales van a permanecer las mediciones al 50 % de las veces. En otras palabras, una medida tiene la misma posibilidad de estar dentro de estos límites o fuera de ellos.

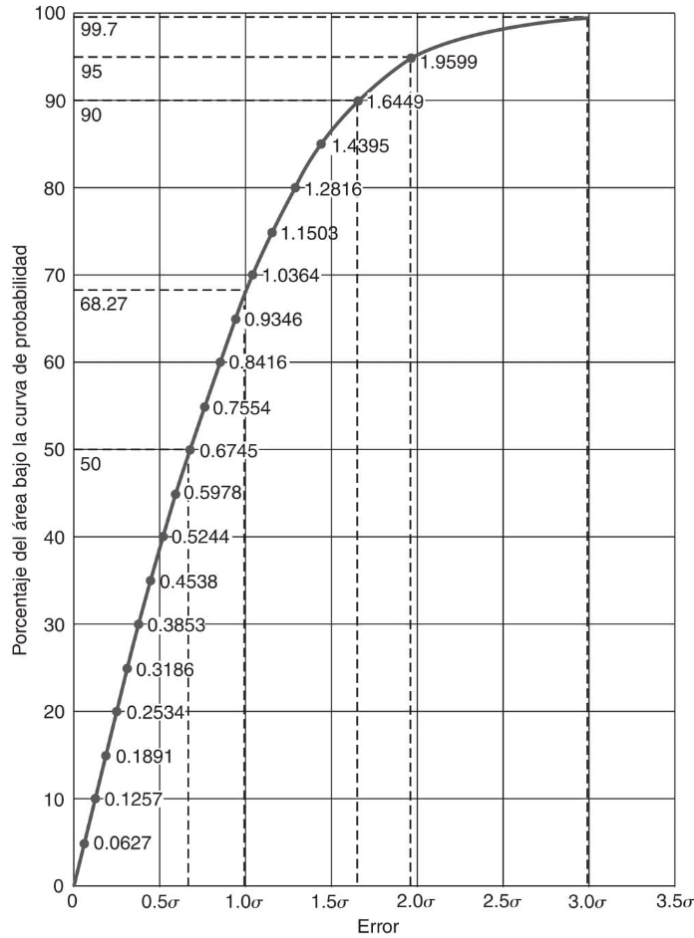


Figura 6.1: Curva de distribución normal
Fuente: Tomado de (Wolf, P, Ghilani, 2016)

El error probable de la media viene dado por la formula de la ecuación (6.3):

$$\sigma = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum v^2}{n(n-1)}} \quad (6.3)$$

Finalmente, con base en las ecuaciones (6.1) y (6.3), se puede estimar el campo que denominado (Control en (X1, X2), (Y1, Y2), (Z1, Z2)), el cual corresponde a la posición de cada una de las coordenadas X, Y, Z: Para ello se utiliza la expresión de la ecuación (6.4):

$$\text{Media} \pm \text{error de la media} \quad (6.4)$$

Variable	Resultado
Error probable:	0.00799
Error de la media:	0.00231
La coordenada (X1) será:	1744398.88737
La coordenada (X2) será:	1744398.88276
Control en (X1)	-0.00705
Control en (X2)	-0.00244

Tabla 6.12: Calculo del error probable de la coordenada (X)
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Resultado
Error probable:	0.03233
Error de la media:	0.00933
La coordenada (Y1) será:	-6116037.0302
La coordenada (Y2) será:	-6116037.0489
Control en (Y1)	0.00388
Control en (Y2)	0.02255

Tabla 6.13: Calculo del error probable de la coordenada (Y)
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Resultado
Error probable:	0.00664
Error de la media:	0.00192
La coordenada (Z1) será:	512731.9032
La coordenada (Z2) será:	512731.8993
Control en (Z1)	-0.00303
Control en (Z2)	0.00081

Tabla 6.14: Calculo del error probable de la coordenada (Z) Fuente: Elaboración propia.

6.3. Análisis de resultados.

Con el objetivo de responder, cual es el mejor de los 12 ejercicios posprocesados, se han calculado las desviaciones estándar, tal como se muestra de las tablas (6.15) a la tabla (6.17), de esta manera tenemos:

En la tabla (6.15) se muestran los resultados, de la desviación estándar, del procesamiento de datos utilizando todas las técnicas PPP, es decir los servicios en línea y el software de escritorio.

Coordenada	Desviación estándar
X	0.04809
Y	0.16360
Z	0.04578

Tabla 6.15: Desviación estándar utilizando todos los procesamientos PPP
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (6.16) se muestran los resultados, de la desviación estándar, del procesamiento de datos utilizando solamente los servicios en línea:

Coordenada	Desviación estándar
X	0.00837
Y	0.01098
Z	0.00513

Tabla 6.16: Desviación estándar del procesamiento utilizando los servicio PPP en línea.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (6.17) se muestran los resultados, de la desviación estándar, del procesamiento de datos utilizando el software de escritorio.

Coordenada	Desviación estándar
X	0.08829
Y	0.26111
Z	0.12419

Tabla 6.17: Desviación estándar del procesamiento utilizando los software PPP
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en las figuras; (6.2), (6.3) y (6.4), y de acuerdo con las desviaciones estándar, se puede observar que los mejores resultado, son los que ofrecen los servicios en línea PPP, ya que como se ve en la tabla (6.16), la dispersión de este conjunto de datos es menor. Ahora en el caso contrario, los resultados que cuya desviación estándar presenta mayor dispersión se observan en la tabla (6.17), que corresponde al cálculo realizado con el software académico.

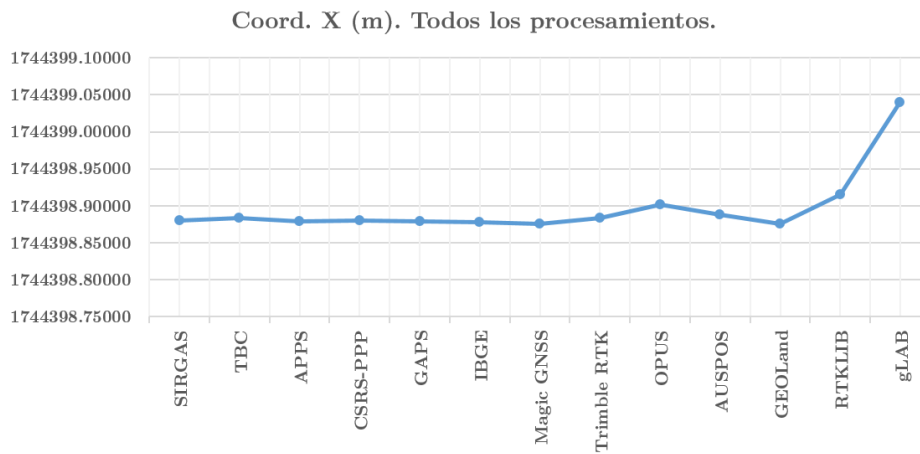


Figura 6.2: Valores de coordenadas X
Fuente: Elaboración propia.

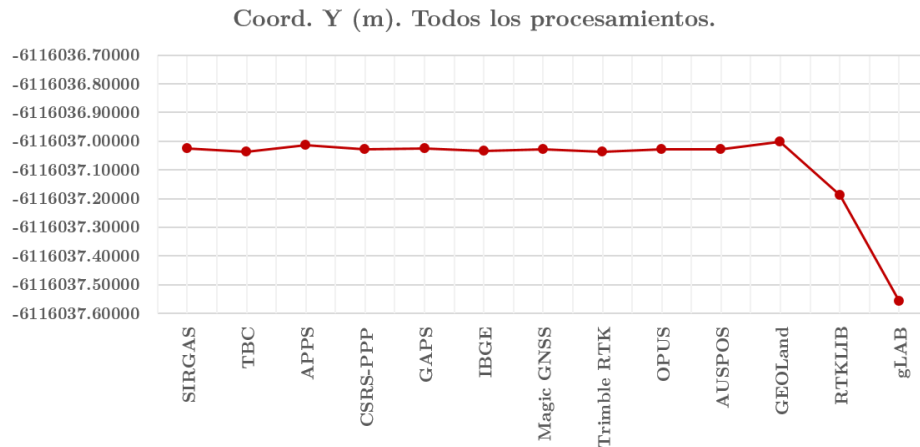


Figura 6.3: Valores de coordenadas Y
Fuente: Elaboración propia.

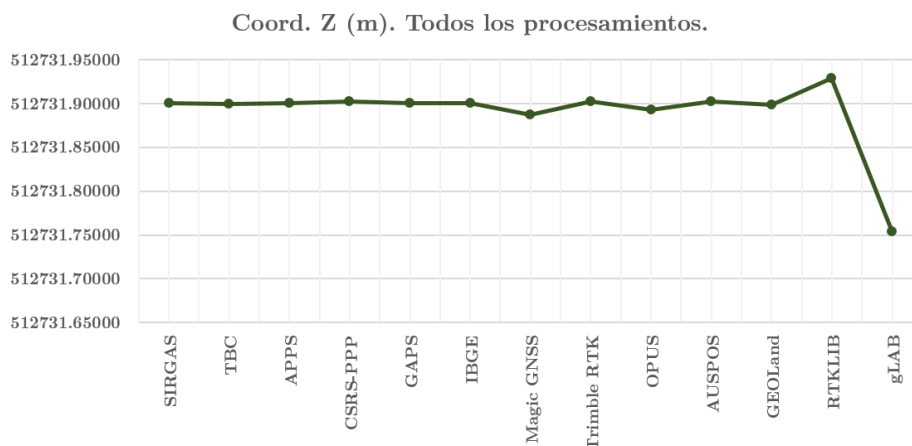


Figura 6.4: Valores de coordenadas Z

Fuente: Elaboración propia.

De todas las coordenadas procesadas, los mejores resultados son los que ofrece el servicio en línea de GAPS, esto se observa al comparar las coordenadas de BOGT certificadas por SIRGAS ver tabla (6.1) y las coordenadas de todos los centros procesamiento de la tabla 6.6. Sin embargo, se aclara que este resultado es el mejor solamente para los valores de las coordenadas (Y) y (Z), por que el valor de la coordenada (X), que me mejor se asemeja al resultado esperado es el que ofrece el centro de procesamiento CSRS-PPP.

Por otro lado, como se observa en la tabla (6.18) al comparar los resultados entre las técnicas de posicionamiento diferencial y absoluto, se observa que las coordenadas obtenidas mediante los servicios en línea PPP, son más precisas que las obtenidas por el método diferencial, como se observan sus diferencia en delta ($X = -0,002068889$, $Y = -0,001671111$, $Z = 0,001728889$), respectivamente.

También se deduce que las coordenadas del método diferencial son más precisas que las coordenadas del procesamiento PPP utilizando software académico. Siendo así, este último resultado el menos preciso con respecto a las coordenadas certificadas por SIRGAS. Con respecto al software académico se resaltan las presiones ofrecidas por el programa RTKLIB.

Promedio	Delta X	Delta Y	Delta Z
Promedio software comercial	-0.0036800	0.0116400	0.0001400
Promedio general (diferencial y absoluto)	-0.0180392	0.057486	0.011106731
Promedio PPP (Servicios en línea)	-0.0020689	-0.0016711	0.001728889
Promedio PPP (Software académico)	-0.0970851	0.34661599	0.058790388

Tabla 6.18: Promedio de las diferencias de coordenadas

Fuente: Realización propia.

Capítulo 7

Conclusiones.

- Como conclusión principal, se puede decir que se ha logrado cumplir con los objetivos del TFM. De la misma manera, ha sido una actividad interesante, el hecho de documentar la técnica PPP, ya que se sale del formato tradicional del posicionamiento diferencial.
- Existe una gran variedad de servicios en línea, que se convierten en una herramienta valiosa a la hora de utilizar la técnica PPP, en este TFM se realizó la exploración, aplicación y documentación de 9 de estos centros de procesamiento, seguramente se quedan algunos por fuera por diferentes razones; falta de tiempo, servicios en mantenimiento e inclusive hasta por desconocimiento. Lo que si se resalta es que estos 9 centros son lo más populares y nombrados en el medio, al momento de realizar este documento. También son los más utilizados y referenciados por artículos consultados en la búsqueda bibliográfica.
- Los indicadores de calidad y precisión que ofrece PPP, son en muchos casos y bajo ciertas condiciones superiores a los alcanzado por el método diferencial. Gracias a esto, este posicionamiento ofrece una alternativa atractiva y complementaria al posicionamiento diferencial del sistema de navegación por satélite GNSS
- El posicionamiento PPP, con el paso del tiempo se ha consolidado como una metodología por excelencia para densificar redes geodésicas, en lugar donde su distribución es pobre o sencillamente no existe. Por otro lado, tanto los servicios PPP en línea, como los software académicos permiten realizar el procesamiento GNSS en modalidad cinemático y estático.
- A pesar de que PPP es un método de observación y posicionamiento tan difundido en los últimos años, no existe una estandarización para la difusión de los resultados obtenidos en un centro de procesamiento. Esto se evidenció con la variedad de reportes generados en el ejercicio de aplicación, unos más detallados que otros, por ejemplo, se pueden ver coordenadas geocéntricas, o coordenadas geográficas, archivos planos o ficheros en pdf, etc. Aunque esto se debe en parte a la autonomía e infraestructura de hardware y software de cada centro de procesamiento.
- Como sabemos para el procesamiento de datos GNSS, existe un catálogo de software clasificados en comercial, científico y académico. Por cuestiones de licenciamiento, solo se puede trabajar con un Trimble Business Center (TBC) en la parte comercial y con RTKLIB y gLAB como software académico. Pero con

respecto al software científico, si existe una barrera para su uso. Por mencionar algo, en mi caso yo hice el contacto con Jet Propulsion Laboratory de la NASA (JPL) a través de su página de Internet y como respuesta me dijeron que el software GIPSY-OASIS está disponible para la comunidad académica, mediante el establecimiento de un contrato interinstitucional y atendiendo unas políticas propias de uso, razón que es perfectamente aceptable, pero que limita la labor investigativa de un estudiante.

- Los informes de procesamiento más completos y con mayor detalle, con respecto a los cálculos realizados a través de las aplicaciones online, para la determinación de las coordenadas del punto BOGT, son los que se generan en el servicio MagicGNSS.
- Los costos e infraestructura de los servicios de procesamiento en tiempo real son más elevados que los ofrecidos por los servicios posprocesados.
- Los resultados de las coordenadas de la estación BOGT, calculados con los servicios PPP en línea son más precisos que los resultados obtenidos mediante la técnica diferencial y el software académico, esto se observa al comparar los valores de coordenadas calculados con las coordenadas de BOGT certificados por SIRGAS.

7.1. Desarrollos Futuros.

- En el territorio colombiano, existen zonas del país que por diferentes razones (seguridad, orden público, accesibilidad, entre otras), no cuentan con el cubrimiento de una red geodésica, ni con estaciones permanentes, razón por la cual considero que sería importante implementar la técnica de posicionamiento PPP, en dichas zonas donde no se puede realizar un posicionamiento diferencial.
- Considero que es importante proponer una iniciativa desde el sector académico, que busque el acogimiento de la comunidad internacional, y propenda por la unión de esfuerzos y logre la estandarización del posicionamiento PPP. Esto en parte, por la diversidad de los modelos matemáticos, ya que, aunque se trate del mismo concepto, se presentan algunas diferencias; como el modelamiento de errores, entre otros aspectos.
- Desde el punto de vista académico, se puede diseñar un servicio PPP e implementarlo a futuro, mediante un convenio entre el sector educativo y una alianza pública privada. La idea sería que este servicio PPP modelara las medidas de los observables; pseudodistancia y medidas de fase, junto con todos los errores que se pueden corregir. Este servicio también iría acompañado de un software de escritorio, desarrollado bajo la luz del licenciamiento de software libre.

Este servicio, pretendería mejorar algunas deficiencias de los servicios actuales, como, por ejemplo; el tamaño del archivo, que no exista limite en el fichero RINEX que se va a importar, otro aspecto que me parece importante es el número de archivos a procesar, todos los servicios consultado a excepción de AUSPOS, dejan cargar solo un archivo. También estandarizar la versión del formato RINEX a importar en el servicio. Además de las técnicas de posicionamiento, que no solo

sea para el modo estático y cineático, si no que se incluyan para el tiempo real RTK. Por último, que las coordenadas generadas utilicen el mismo formato de salida (ECEF) y lo más importante, es que estén referidas siempre a la época correspondiente del ITRF y no a la época de posicionamiento.

Bibliografía

- AIUB (2019). Bernese GNSS Software. <http://www.bernese.unibe.ch/>.
- Alban, M., Tierra, A., and Romero, R. (2016). Cálculo de coordenadas usando el método Precise Point Positioning –PPP estático mediante el software libre RTKLIB.
- Berné, J. L., Anquela Julián, A. B., and Natalia, V. G. (2014). *GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Univeridad Politécnica de Valencia, primera edition.
- Bisnath, S. and Gao, Y. (2009). Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations. In *Observing our Changing Earth*, pages 615–623. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Canada., N. R. (2014). <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
- Capilla Romá, R. M. (2015). *Aportaciones al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación GNSS*.
- DLR (2019). <https://www.dlr.de/rb/en/desktopdefault.aspx/tabid-10749/>.
- Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J., and Rózsa, S. (2016). The Geodesist’s Handbook 2016.
- Fernández Plazaola, U. (2003). *Técnicas de resolución de la ambigüedad de las medidas de fase en sistemas de navegación por satélite*. PhD thesis, Universidad de Málaga.
- GAGE (2019). Research Group of Astronomy and Geomatics. <https://gage.upc.es/>.
- GAMIT/GLOBK (2019). <http://geoweb.mit.edu/gg/>.
- GAPS (2019). GNSS Analysis and positioning software. <http://gaps.gge.unb.ca/>.
- GEOLan Donosti (2002). GEOLan. <http://www.geolandonosti.com>.
- Geoscience Australia (2019). AUSPOS. <http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>.
- GIPSY-OASIS (2019). <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>.
- GMV Aerospace and Defense SA (2019). <https://magicgnss.gmv.com>.
- Gonzalo Calderón, A. B. (2017). Posicionamiento y Navegación, Tema 1. pages 1–24.
- Héroux, P. and Kouba, J. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6):573–578.

- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2011). Mathematical models for positioning. In *Global Positioning System*, pages 181–202. Springer Vienna, Vienna.
- IBGE-PPP (2019). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?edicao=16335&t=o>.
- International GNSS Service (IGS) (2007). RTTPP. <http://www.rtgis.net/>.
- International GNSS Service (IGS) (2019). Gns calendar and utility. <http://www.gnsscalendar.com/>.
- Kouba, J., Lahaye, F., and Tétreault, P. (2017). Precise Point Positioning. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, pages 723–751.
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krasna, H., and Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques. *Geophysical Research Letters*, 40:1069–1073.
- Leandro, R., Santos, M., and B. Langley, R. (2006a). UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance. 2.
- Leandro, R. F., Santos, M., and Santos, M. C. (2006b). Wide Area Based Precise Point Positioning.
- Leick, A., Rapoport, L., and Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*, volume 112. New Jersey, fourth edition.
- NASA’s Jet Propulsion Laboratory (2019a). Automatic Precise Positioning Service itle. <http://apps.gdgps.net/>.
- NASA’s Jet Propulsion Laboratory (2019b). The Global Differential GPS (GDGPS). <http://www.gdgps.net/index.html>.
- National Geodetic Survey (2019). <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.
- Navipedia (2019). https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page.
- NGS (2019). OPUS. <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/index.jsp>.
- RTKLIB (2019). <http://www.rtklib.com/>.
- Sanz Subirana, J., Zornoza, J., and Hernández-Pajares, M. (2013). *Gnss Data Processing. Fundamentals and Algorithms*, volume I.
- SIRGAS (2019). Coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS. <http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/coordinates/weekly-positions/>.
- Soycan, M. (2012). A Quality Evaluation of Precise Point Positioning within the Bernese GPS Software Version 5.0. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(1):147–162.
- Subirana, J., Zornoza, J., and Hernández-Pajares, M. (2013). *Gnss Data Processing*, volume II.

- Teunissen, P. J. G. and Khodabandeh, A. (2015). Review and principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*, 89(3):217–240.
- Trimble (2019). Servicio de post-procesamiento Trimble CenterPoint RTX.
- UNAVCO (2019). <https://www.unavco.org/>.
- Valero, J. L. B., Villén, N. G., and Romá, R. C. (2019). *GLONASS , BEIDOU Fundamentos y métodos de posicionamiento*.
- Witchayangkoon, B. (2000). Elements of GPS precise point positioning / Evaluation of installation of GPS on public vehicles as required by Thai law. View project Road Safety, Planning and Design View project. (June 2000).
- Wolf, P, Ghilani, C. (2016). *Topografía*. Mexico, 14 edition.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3):5005–5017.

Apéndice A

Anexo I: Informe del procesamiento Diferencial con TBC.

Universidad Salamnca

Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y
Arquitectura
TFM

Phone: 3204921339
john.orduna@usal.es

Project File Data

Name: Z:\Proyectos\Master_USAL\15_TFM
(MUGC)\Calculos\proc_trimble\proc_trimble_tfm.vce
Size: 565 KB
Modified: 01/09/2019 23:02:29 (UTC:-5)
Time zone: Hora est. Pacífico, Sudamérica
Reference
number:
Description:

Coordinate System

Name: Colombia
Datum: WGS 1984
Zone: Bogota MAGNA
Geoid: Colombia Geoid
2004
Vertical
datum:

Network Adjustment Report

Adjustment Settings

Set-Up Errors

GNSS

Error in Height of Antenna: 0.003 m

Centering Error: 0.000 m

Covariance Display

Horizontal:

Propagated Linear Error [E]: U.S.

Constant Term [C]: 0.000 m

Scale on Linear Error [S]: 1.960

Three-Dimensional

Propagated Linear Error [E]: U.S.

Constant Term [C]: 0.000 m

Scale on Linear Error [S]: 1.960

Adjustment Statistics

Number of Iterations for Successful Adjustment: 2

Network Reference Factor: 1.00
Chi Square Test (95%): Passed
Precision Confidence Level: 95%
Degrees of Freedom: 8

Post Processed Vector Statistics

Reference Factor: 1.00
Redundancy Number: 8.00
A Priori Scalar: 2.47

Control Point Constraints

Point ID	Type	North σ (Meter)	East σ (Meter)	Height σ (Meter)	Elevation σ (Meter)
DORA	Global	Fixed	Fixed	Fixed	
IBAG	Global	Fixed	Fixed	Fixed	
TUNA	Global	Fixed	Fixed	Fixed	
Fixed = 0.000001(Meter)					

Adjusted Grid Coordinates

Point ID	Northing (Meter)	Northing Error (Meter)	Easting (Meter)	Easting Error (Meter)	Elevation (Meter)	Elevation Error (Meter)	Constraint
BOGT	1004851.697	0.002	999619.229	0.003	2550.057	0.022	
DORA	1094872.411	?	935080.602	?	185.846	?	LLh
IBAG	981502.035	?	873772.858	?	1188.675	?	LLh
TUNA	1103456.874	?	1079075.057	?	2805.911	?	LLh

Adjusted Geodetic Coordinates

Point ID	Latitude	Longitude	Height (Meter)	Height Error (Meter)	Constraint
BOGT	N4°38'24.26935"	O74°04'51.38261"	2576.250	0.022	
DORA	N5°27'13.84573"	O74°39'47.92681"	204.479	?	LLh
IBAG	N4°25'40.96617"	O75°12'53.00439"	1216.085	?	LLh
TUNA	N5°31'52.78853"	O73°21'49.97494"	2831.845	?	LLh

Adjusted ECEF Coordinates

Point ID	X (Meter)	X Error (Meter)	Y (Meter)	Y Error (Meter)	Z (Meter)	Z Error (Meter)	3D Error (Meter)	Constraint
BOGT	1744398.884	0.006	-6116037.038	0.021	512731.900	0.003	0.022	
DORA	1679425.250	?	-6123536.832	?	602182.449	?	?	LLh
IBAG	1623166.646	?	-6149837.632	?	489244.383	?	?	LLh
TUNA	1818373.174	?	-6085596.879	?	610965.172	?	?	LLh

Error Ellipse Components

Point ID	Semi-major axis (Meter)	Semi-minor axis (Meter)	Azimuth
BOGT	0.004	0.002	84°

Adjusted GNSS Observations

Transformation Parameters

Deflection in Latitude: -0.020 seg (95%) 0.031 seg
Deflection in Longitude: 0.002 seg (95%) 0.045 seg
Azimuth Rotation: -0.001 seg (95%) 0.002 seg
Scale Factor: 1.00000029 (95%) 0.00000002

Observation ID		Observation	A-posteriori Error	Residual	Standardized Residual
DORA --> TUNA (PV20)	Az.	86°31'57"	0.002 seg	-0.002 seg	-2.604

	ΔHt.	2627.367 m	0.020 m	0.003 m	0.324
	Ellip Dist.	144246.901 m	0.002 m	0.002 m	0.723
TUNA --> BOGT (PV17)	Az.	218°55'37"	0.005 seg	0.003 seg	1.500
	ΔHt.	-255.606 m	0.021 m	0.001 m	0.071
	Ellip Dist.	126630.869 m	0.003 m	0.000 m	-0.037
DORA --> IBAG (PV11)	Az.	208°21'16"	0.002 seg	0.004 seg	1.464
	ΔHt.	1011.594 m	0.020 m	-0.001 m	-0.108
	Ellip Dist.	128870.435 m	0.002 m	0.000 m	-0.135
IBAG --> BOGT (PV13)	Az.	79°23'59"	0.003 seg	0.001 seg	1.060
	ΔHt.	1360.167 m	0.021 m	0.001 m	0.066
	Ellip Dist.	127985.729 m	0.004 m	0.001 m	0.616
DORA --> BOGT (PV15)	Az.	144°18'33"	0.005 seg	-0.001 seg	-0.284
	ΔHt.	2371.762 m	0.019 m	-0.001 m	-0.069
	Ellip Dist.	110763.383 m	0.002 m	0.001 m	0.690

Covariance Terms

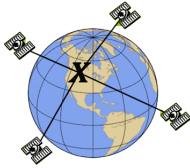
From Point	To Point		Components	A-posteriori Error	Horiz. Precision (Ratio)	3D Precision (Ratio)
BOGT	TUNA	Az.	38°51'48"	0.004 seg	1 : 48918173	1 : 48862463
		ΔHt.	255.595 m	0.022 m		
		ΔElev.	255.854 m	0.022 m		
		Ellip Dist.	126630.906 m	0.003 m		
DORA	BOGT	Az.	144°18'33"	0.005 seg	1 : 49265655	1 : 50186764
		ΔHt.	2371.771 m	0.022 m		
		ΔElev.	2364.211 m	0.022 m		
		Ellip Dist.	110763.416 m	0.002 m		
DORA	IBAG	Az.	208°21'16"	0.000 seg	1 : 0	1 : 0
		ΔHt.	1011.606 m	0.000 m		
		ΔElev.	1002.829 m	0.000 m		
		Ellip Dist.	128870.473 m	0.000 m		
DORA	TUNA	Az.	86°31'57"	0.000 seg	1 : 0	1 : 0
		ΔHt.	2627.366 m	0.000 m		
		ΔElev.	2620.065 m	0.000 m		
		Ellip Dist.	144246.943 m	0.000 m		

IBAG	BOGT	Az.	79°23'59"	0.003 seg	1 : 40945163	1 : 40985272
		ΔHt.	1360.165 m	0.022 m		
		ΔElev.	1361.382 m	0.022 m		
		Ellip Dist.	127985.767 m	0.003 m		

Date: 06/09/2019 14:04:52	Project: Z:\Proyectos\Master_USAL\15_TFM (MUGC)\Calculos\proc_trimble\proc_trimble_tfm.vce	Trimble Business Center
---------------------------	---	-------------------------

Apéndice B

Anexo II: Informe del procesamiento PPP.



CSRS-PPP 2.26.1 (2019-05-31)



bogt1840.19o
BOGT

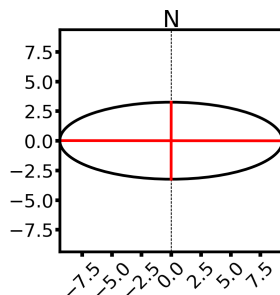
Data Start	Data End	Duration of Observations
2019-07-03 00:00:00.00	2019-07-03 23:59:30.00	23:59:30
Processing Time		Product Type
19:53:51 UTC 2019/08/25		IGS Final
Observations	Frequency	Mode
Phase and Code	Double	Static
Elevation Cut-Off	Rejected Epochs	Estimation Steps
7.5 degrees	0.00 %	30.00 sec
Antenna Model	APC to ARP	ARP to Marker
JAVRINGANT_DM NONE	L1 = 0.090 m L2 = 0.116 m	H:0.061m / E:0.000m / N:0.000m

(APC = antenna phase center; ARP = antenna reference point)

Estimated Position for bogt1840.19o

	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height
ITRF14 (2019)	4° 38' 24.26942"	-74° 4' 51.38265"	2576.238 m
Sigmas(95%)	0.003 m	0.007 m	0.012 m
A priori*	4° 38' 24.26315"	-74° 4' 51.38238"	2576.778 m
Estimated – A priori	0.193 m	-0.008 m	-0.540 m

95% Error Ellipse (mm)
 semi-major: 9.366 mm
 semi-minor: 3.247 mm
 semi-major azimuth: 90° 3' 5.91"



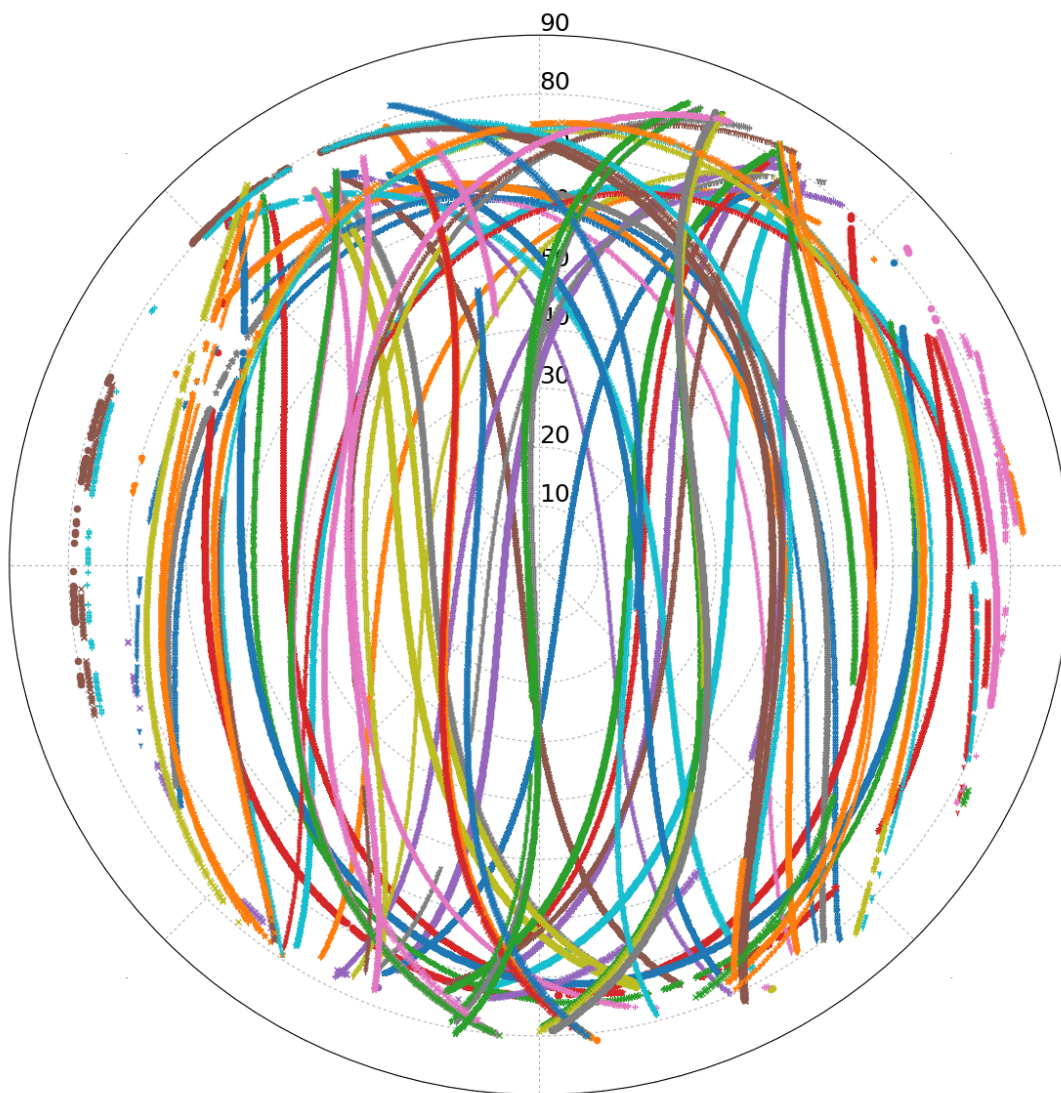
UTM (North) Zone 18

512945.074 m (N)
601939.805 m (E)

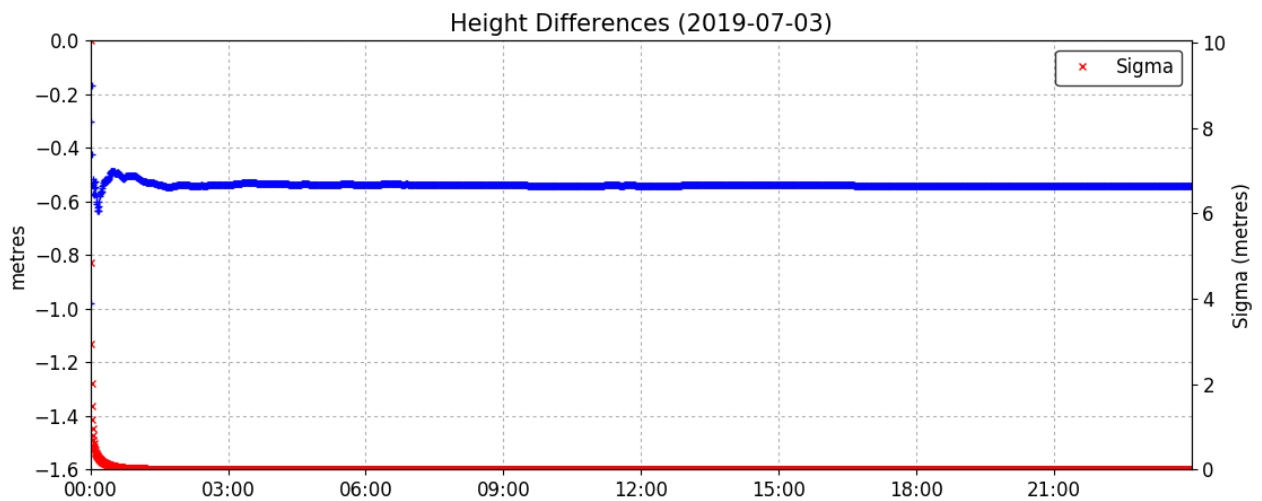
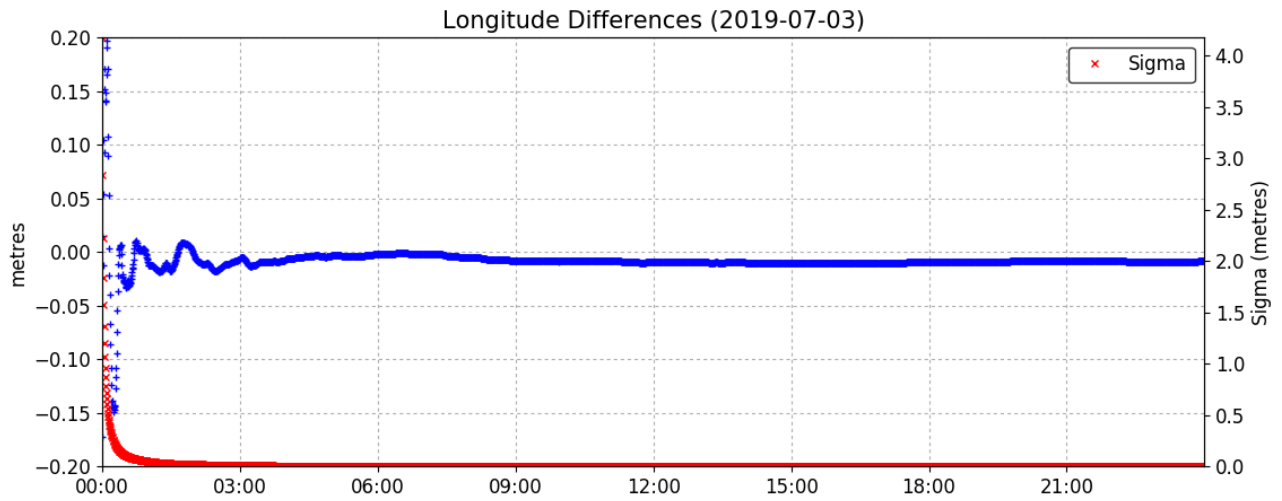
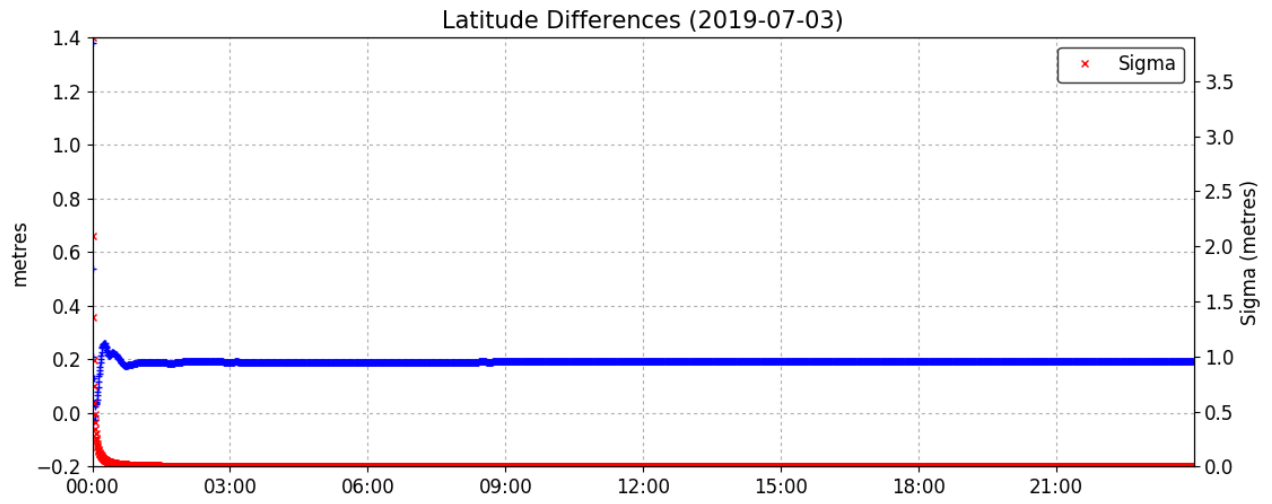
Scale Factors
 0.999729 (point)
 0.999322 (combined)

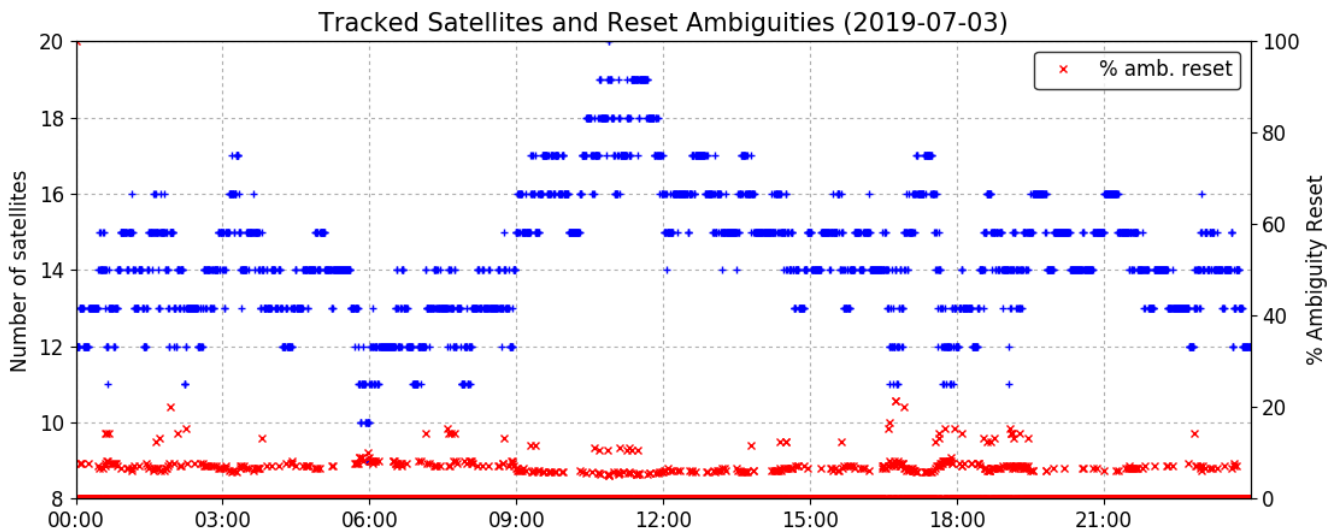
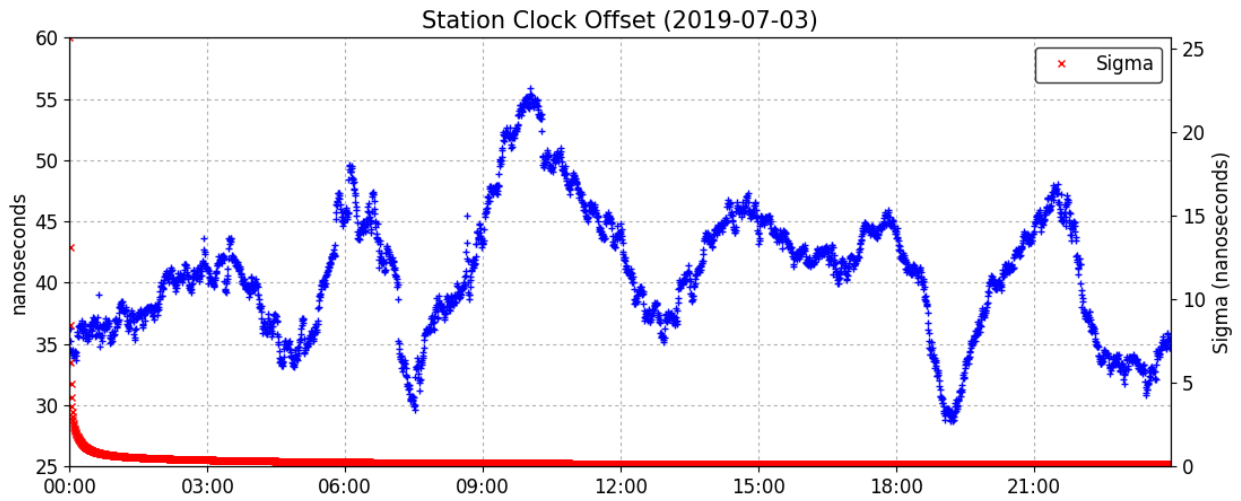
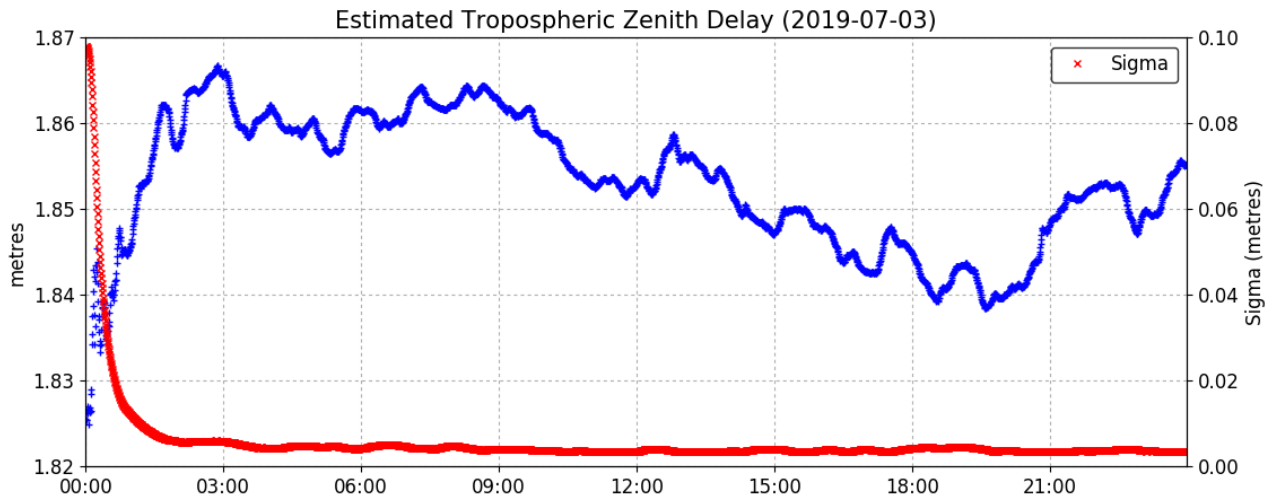
*(Coordinates from RINEX header used as a priori position)

Satellite Sky Distribution

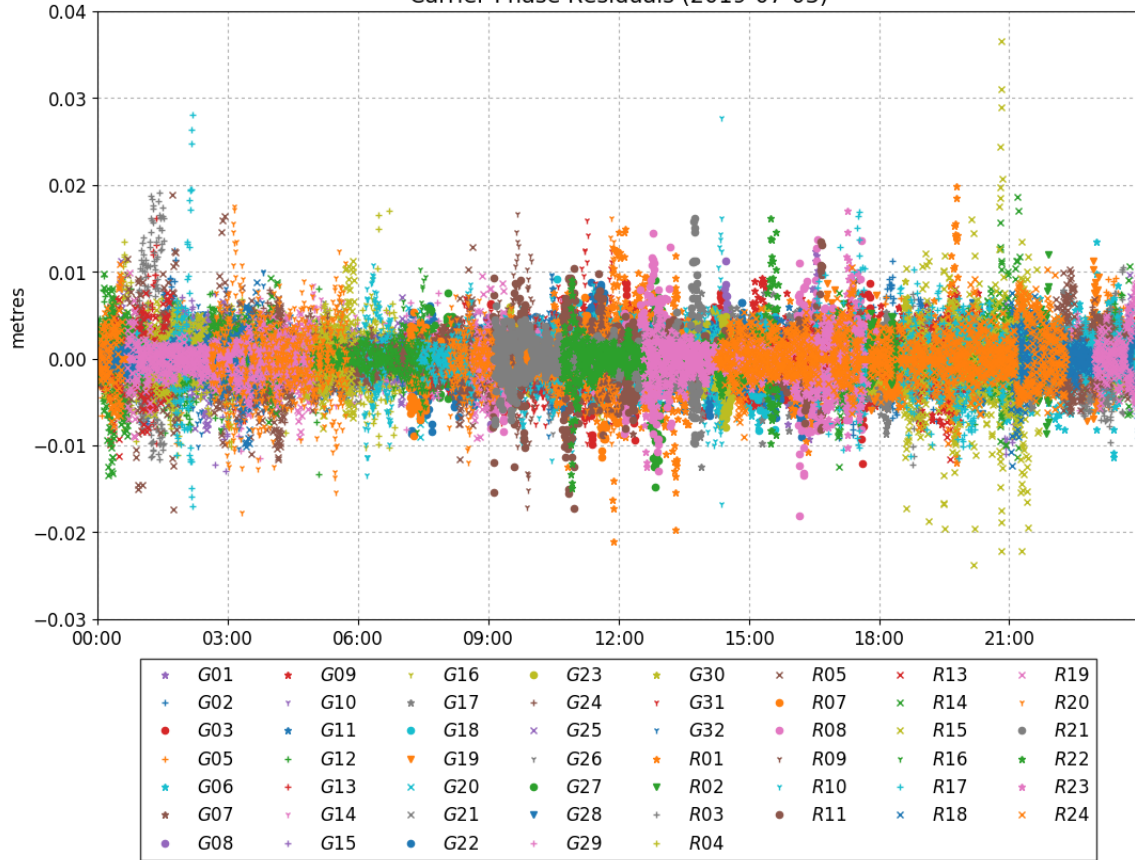


•	G01	•	G11	×	G20	+	G29	•	R07	+	R17
+	G02	+	G12	×	G21	•	G30	•	R08	×	R18
•	G03	+	G13	•	G22	+	G31	+	R09	×	R19
+	G05	+	G14	•	G23	+	G32	+	R10	+	R20
•	G06	+	G15	+	G24	•	R01	•	R11	•	R21
•	G07	+	G16	×	G25	+	R02	×	R13	•	R22
•	G08	•	G17	+	G26	+	R03	•	R14	•	R23
•	G09	•	G18	•	G27	+	R04	•	R15	×	R24
+	G10	•	G19	+	G28	×	R05	+	R16		

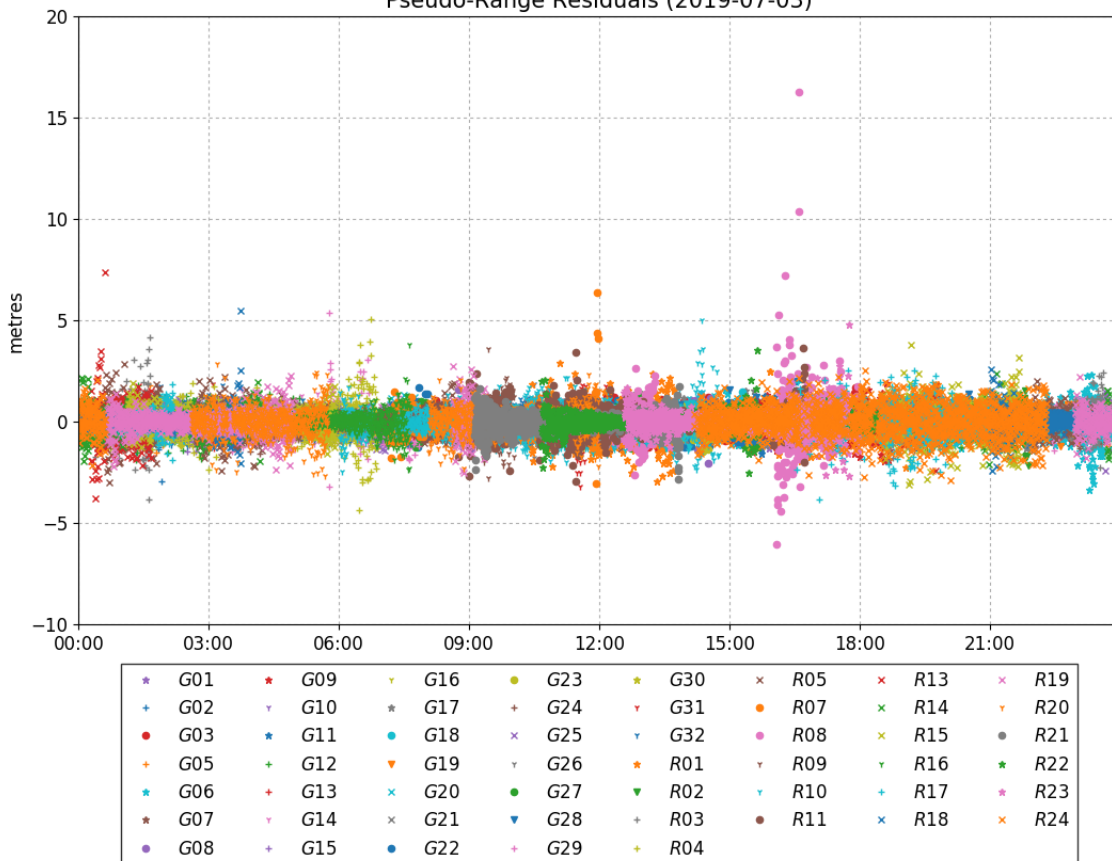




Carrier-Phase Residuals (2019-07-03)



Pseudo-Range Residuals (2019-07-03)



Sumário do Processamento do marco: BOGT

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2019/07/03 00:00:00,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2019/07/03 23:59:30,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	JAVRINGANT_DM NONE
Órbitas dos satélites:¹	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	30,00
Sigma² da pseudodistância(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena³(m):	0,061
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	0,95 GPS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,56 GPS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	4° 38' 24,2597"	-74° 04' 51,3817"	2.576,24	512944.776	601939.835	-75
Na data do levantamento ⁵	4° 38' 24,2688"	-74° 04' 51,3827"	2.576,24	512945.055	601939.803	-75
Sigma(95%)⁶ (m)	0,001	0,004	0,007			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	Fora do Contorno do Brasil					
Altitude Ortométrica (m)	Fora do Contorno do Brasil					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

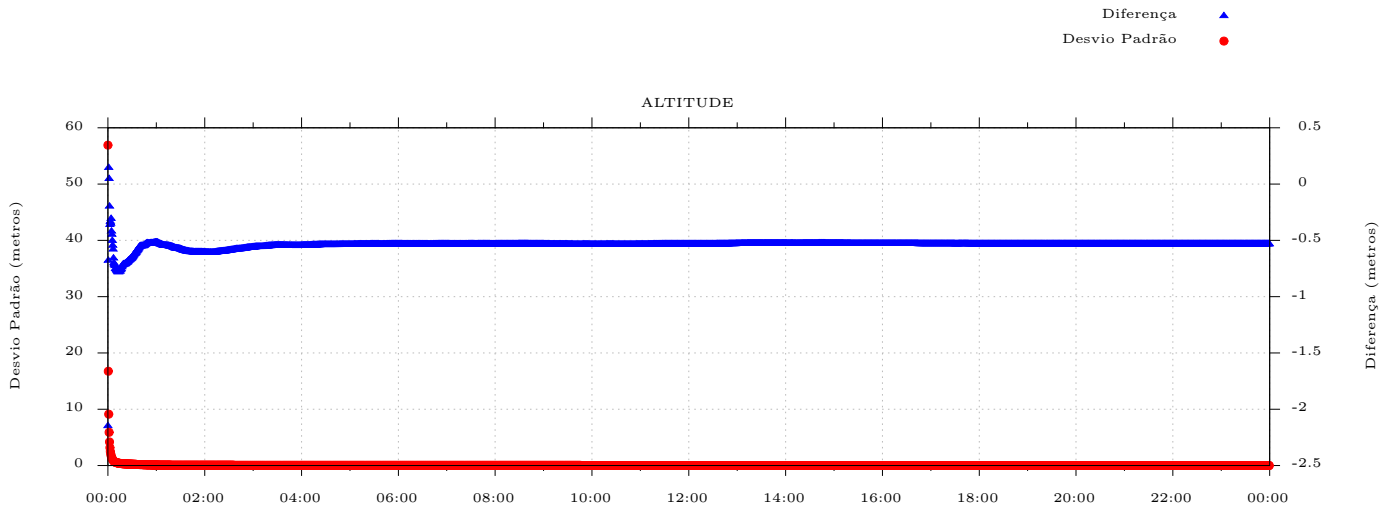
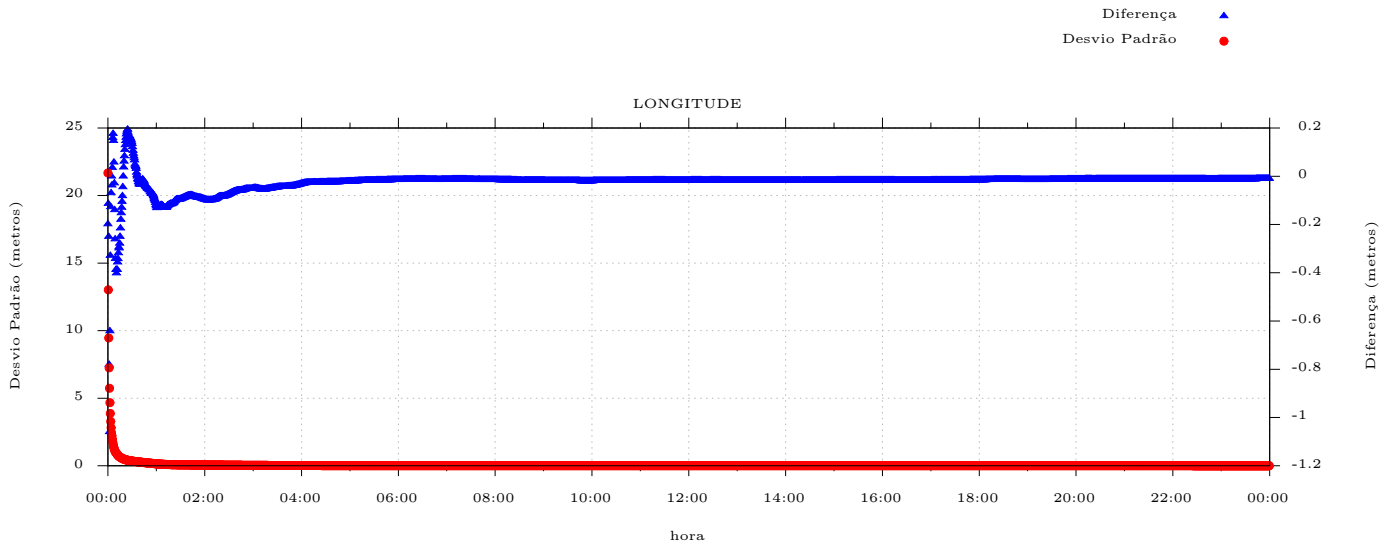
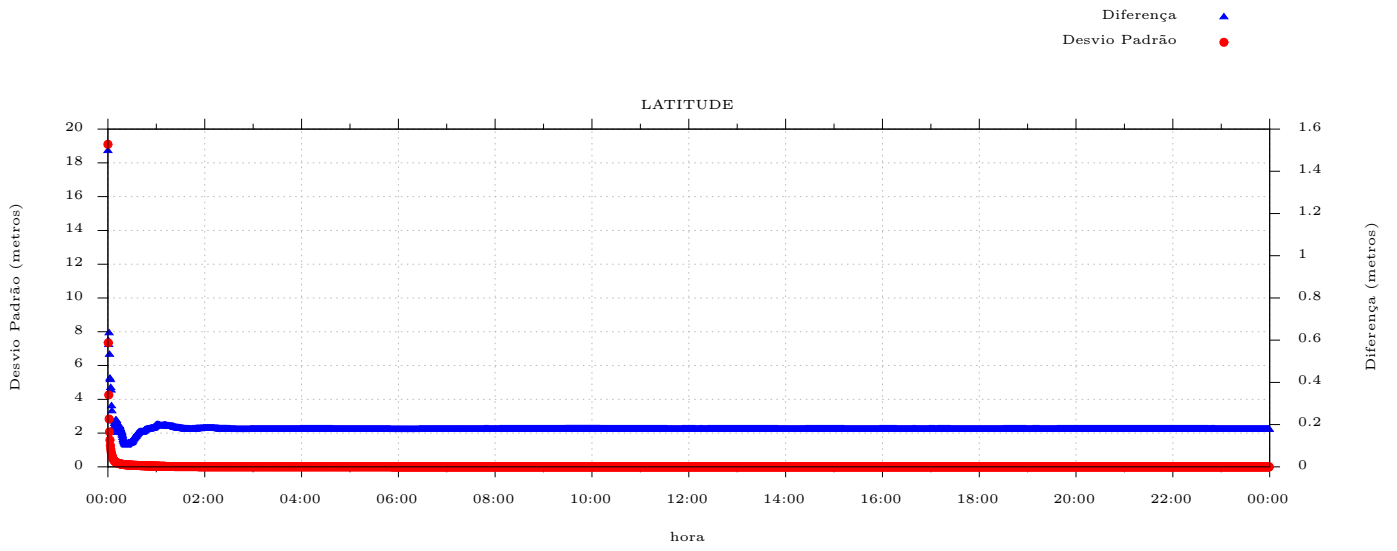
⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário. Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181.

Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCAN)

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
bogt1840.19o



~~~ Disclaimer ~~~

Natural Resources Canada does not assume any liability deemed to have been caused directly or indirectly by any content of its CSRS-PPP online positioning service.

If you have any questions, please feel free to contact:

**Geodetic Integrated Services
Canadian Geodetic Survey
Surveyor General Branch
Natural Resources Canada
Government of Canada
588 Booth Street, Room 334
Ottawa, Ontario K1A 0Y7
Phone: 343-292-6617**

Email: nrcan.geodeticinformation-informationgeodesique.rncan@canada.ca



**Natural Resources
Canada**

**Ressources naturelles
Canada**

Canada



A product by



PPP REPORT

User: magicppp
Scenario: 133126
Start Date: 2019/07/03-00:00:00 (19184)
End Date: 2019/07/03-24:00:00 (19184)
Run Date: 2019/08/26-00:44:13 UTC

QUALITY DATA, ALGORITHMS AND PRODUCTS
FOR THE GNSS USER COMMUNITY

magicgnss.gmv.com
www.gmv.com

Table of Contents

1. CONFIGURATION SUMMARY	3
1.1. LIST OF STATIONS AND RINEX FILES	3
1.2. LIST OF SATELLITES	3
1.3. SETTINGS	3
2. PROCESSING SUMMARY	3
2.1. PARAMETER ESTIMATION	3
2.2. CONVERGENCE	3
2.3. REJECTED STATIONS AND SATELLITES	4
2.4. NUMBER OF USED AND REJECTED MEASUREMENTS	4
2.5. MEASUREMENT RESIDUALS	4
2.6. RESIDUALS VS ELEVATION	5
3. PRODUCTS SUMMARY	5
3.1. INTER-CHANNEL BIASES	5
3.2. INTER-SYSTEM BIASES	6
3.3. ZENITH TROPOSPHERIC DELAY	6
3.4. STATION CLOCKS	6
3.5. ESTIMATED COORDINATES	9
3.6. DIFFERENCE BETWEEN REFINED AND A PRIORI COORDINATES	9

1. CONFIGURATION SUMMARY

1.1. LIST OF STATIONS AND RINEX FILES

Number of stations: 1

bogt

bogt1840.19o

1.2. LIST OF SATELLITES

Number of satellites: 52

G01, G02, G03, G05, G06, G07, G08, G09, G10, G11, G12, G13, G14, G15, G16, G17, G18, G19, G20, G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27, G28, G29, G30, G31, G32, R01, R02, R04, R05, R06, R07, R08, R10, R11, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24

1.3. SETTINGS

Data Sampling Rate	30 s
Minimum Elevation Angle	10 deg
Number of Iterations	6
Reference Products	GMV Rapid

Table 1. Settings

2. PROCESSING SUMMARY

2.1. PARAMETER ESTIMATION

Constellations	Total Measurements	Clock Parameters	Non Clock Parameters	Ambiguities
GPS Glonass	65760	3181	396	344

Table 2. Parameter estimation

2.2. CONVERGENCE

A priori weight of code measurements: 0.250 m (GPS) / 0.300 m (GLONASS)

A priori weight of phase measurements: 0.006 m (GPS) / 0.006 m (GLONASS)

Iteration Number	RMS of Weighted Residuals	Delta RMS of Weighted Residuals	RMS of Code Residuals m	RMS of Phase Residuals m
GPS Glonass				
0	306.507	-	3.698	3.674
1	1.723	304.784	0.351	0.013
2	1.469	0.254	0.339	0.010
3	1.438	0.031	0.337	0.010
4	1.430	0.007	0.335	0.010
5	1.428	0.002	0.335	0.010
6	1.428	0.000	0.335	0.010

Table 3. Convergence

2.3. REJECTED STATIONS AND SATELLITES

Rejected Stations: None

Rejected Satellites: R06

2.4. NUMBER OF USED AND REJECTED MEASUREMENTS

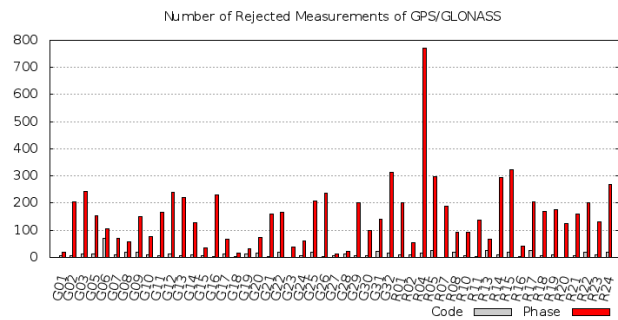
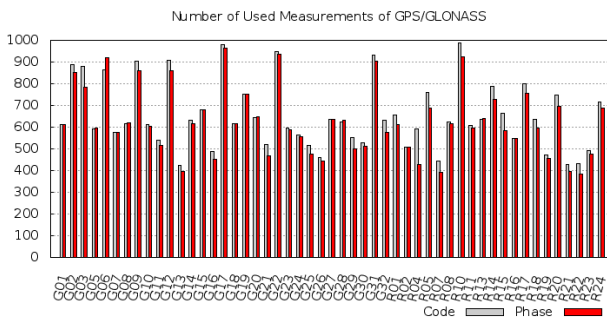
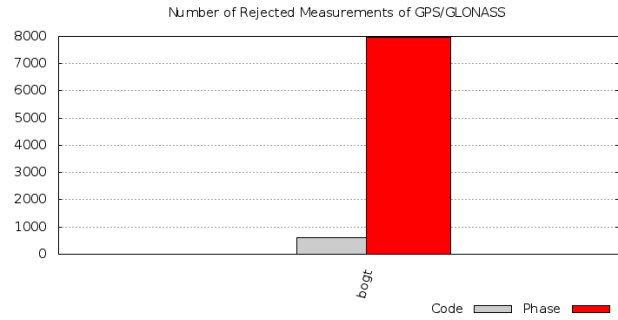
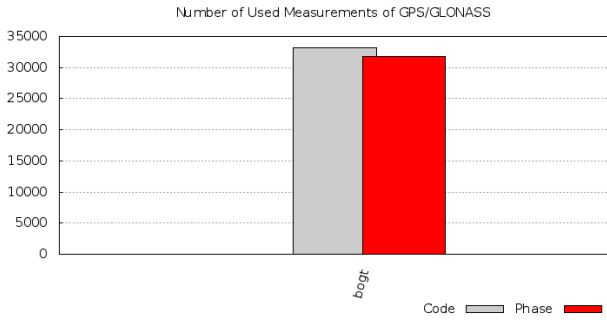


Table 4. Number of Used and Rejected Measurements

2.5. MEASUREMENT RESIDUALS

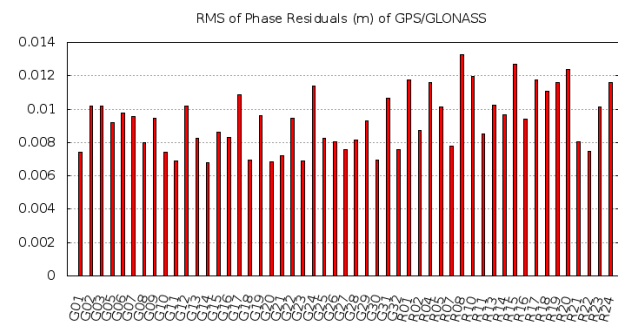
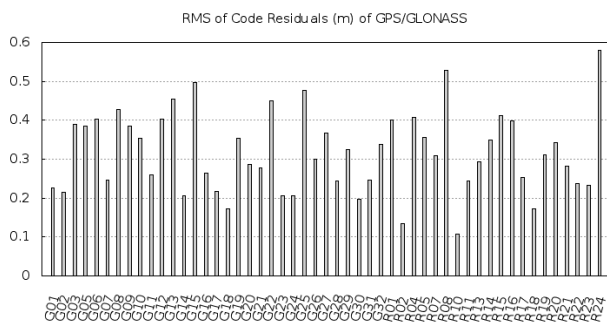
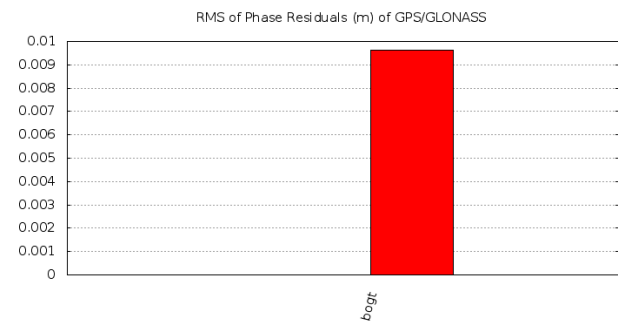
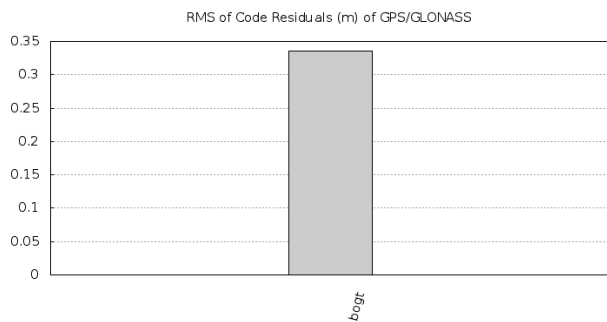


Table 5. RMS of Residuals

2.6. RESIDUALS VS ELEVATION

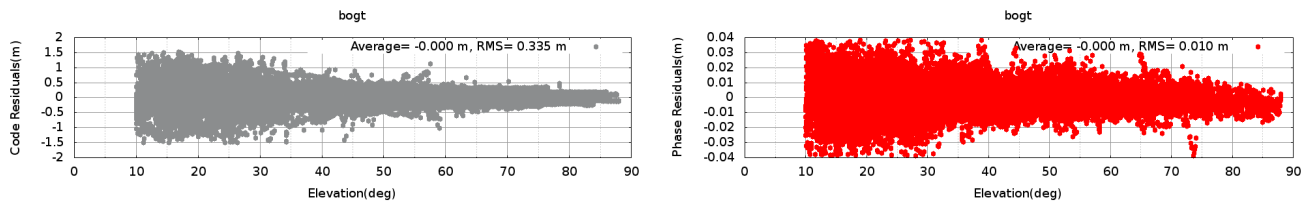
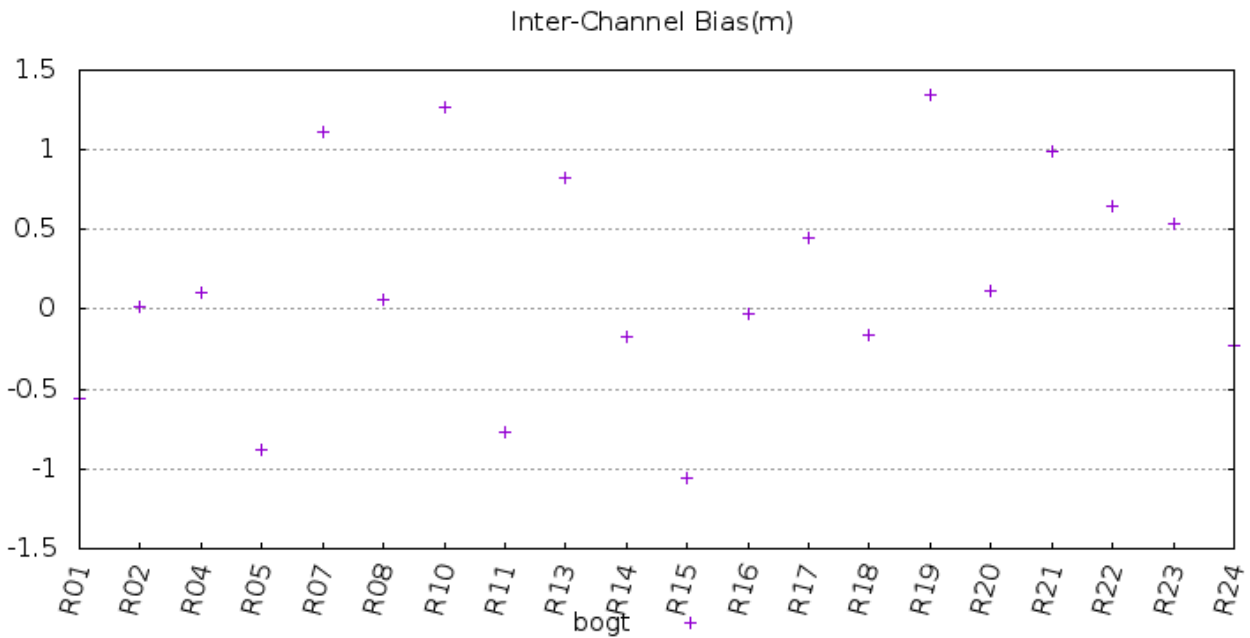


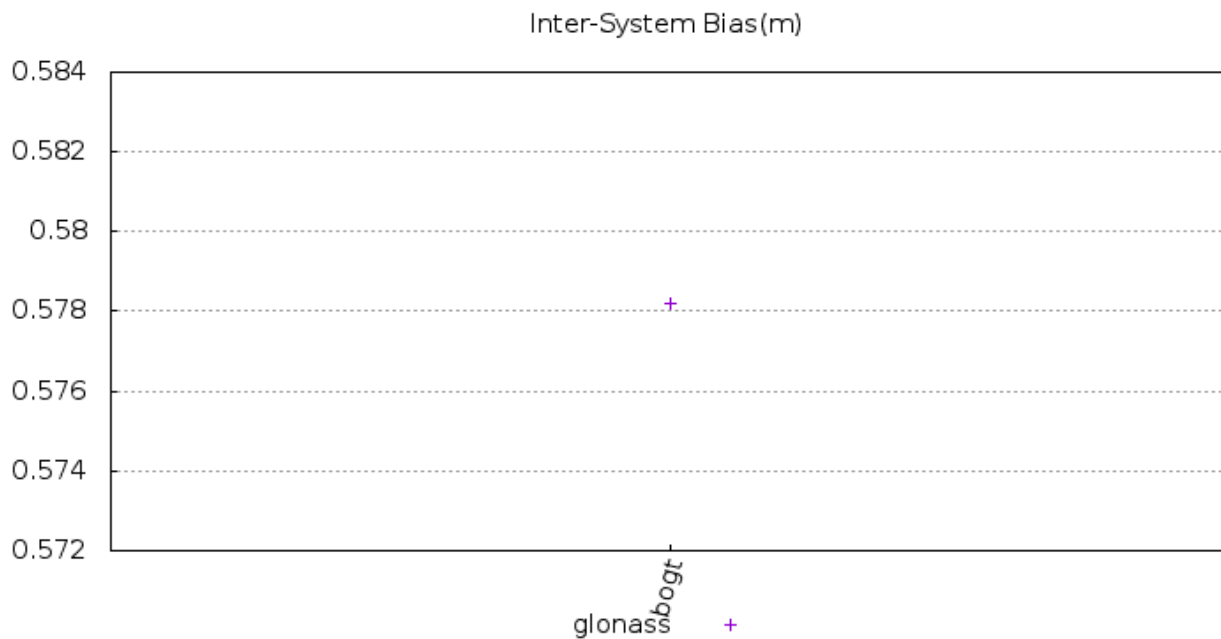
Table 6. Residuals vs. Elevation

3. PRODUCTS SUMMARY

3.1. INTER-CHANNEL BIASES



3.2. INTER-SYSTEM BIASES



3.3. ZENITH TROPOSPHERIC DELAY

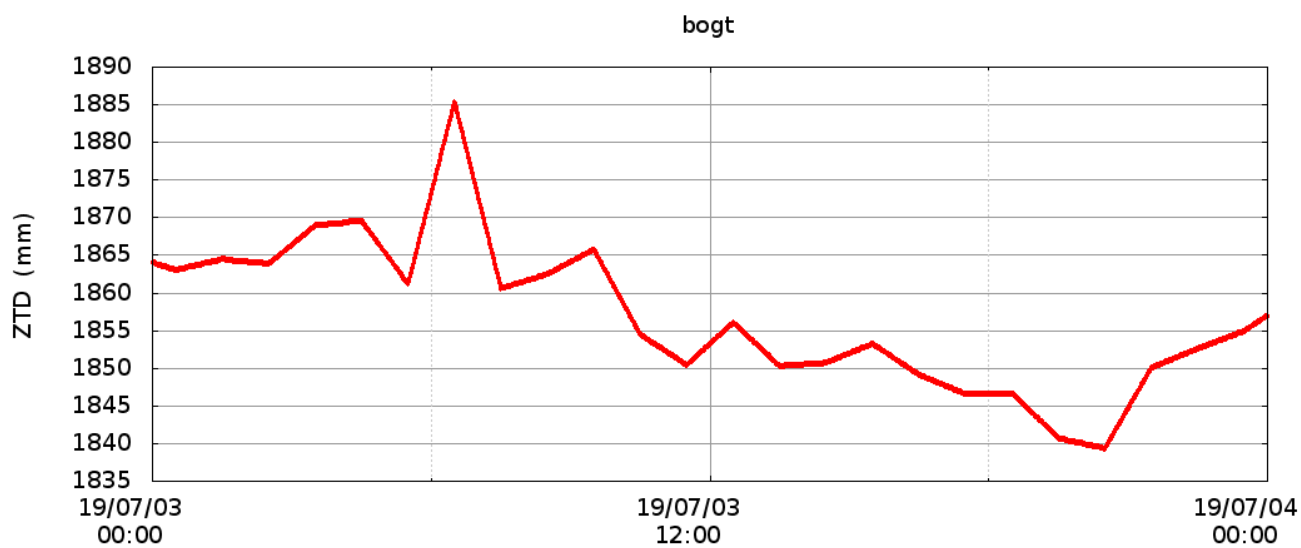


Table 7. Zenith Tropospheric Delay

3.4. STATION CLOCKS

The following figures show the clock offset with respect to GMV Internal time scale:

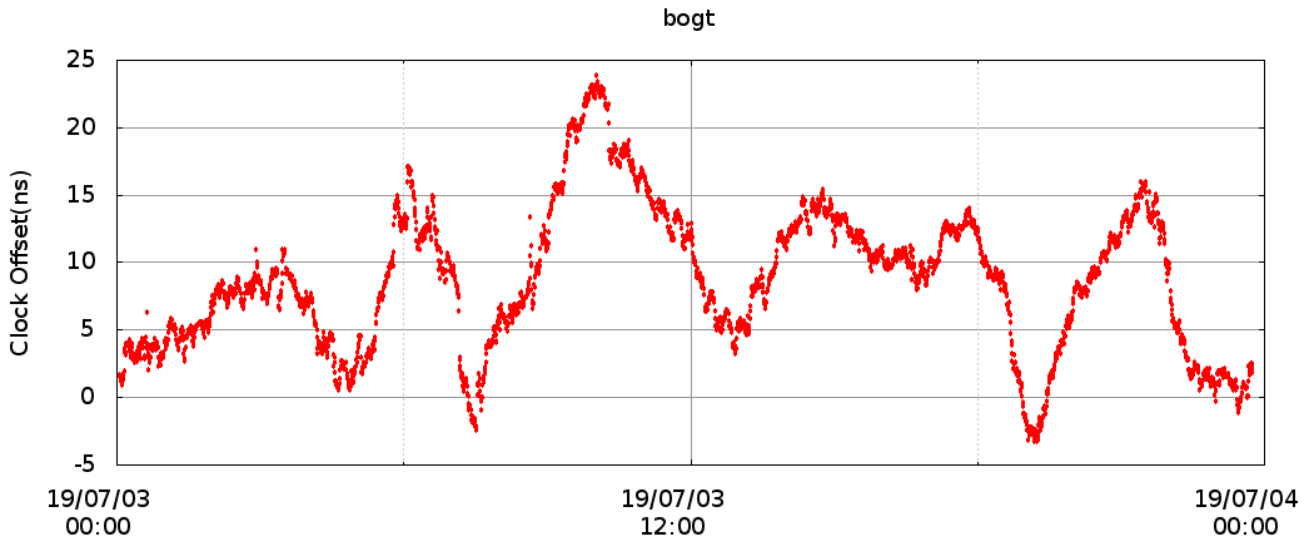


Table 8. Station Clocks

The following figures show the clock offset after the removal of a parabola.

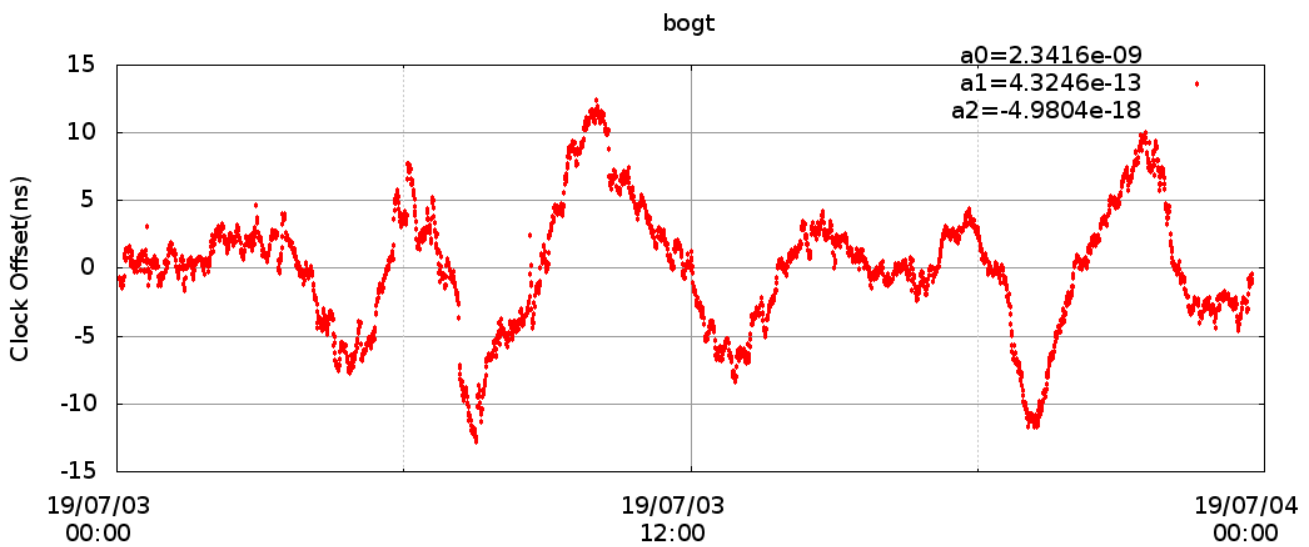
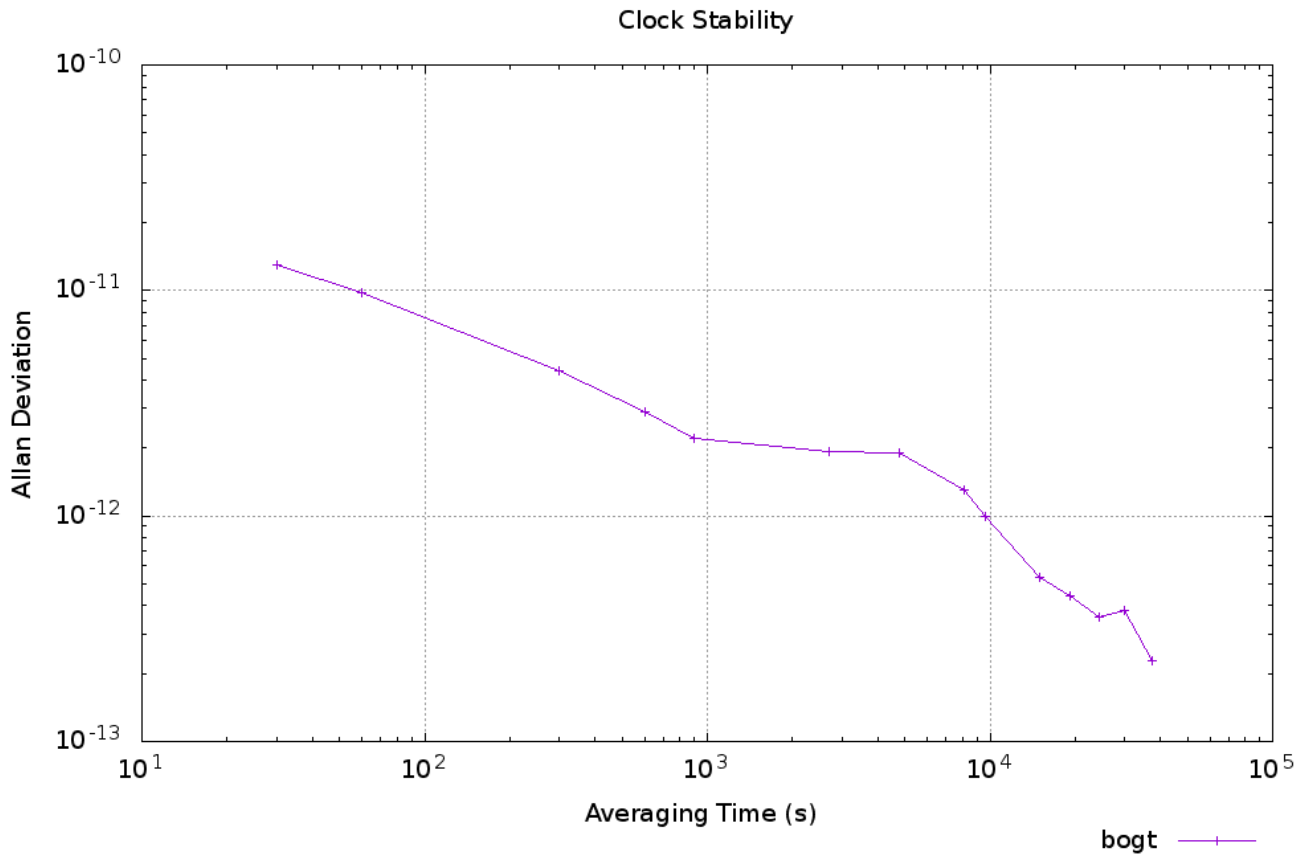


Table 9. Station Clocks



3.5. ESTIMATED COORDINATES

Estimated station coordinates are provided in ITRF14 and PZ90 reference systems.

Station	Longitude(dms)	Latitude(dms)	Height(m)
bogt (ITRF14)	-74 4 51.3828	4 38 24.2689	2576.236

Table 10. Estimated Coordinates in ITRF14

Station	Longitude(dms)	Latitude(dms)	Height(m)
bogt (PZ90)	-74 4 51.3827	4 38 24.2689	2576.236

Table 11. Estimated Coordinates in PZ90

3.6. DIFFERENCE BETWEEN REFINED AND A PRIORI COORDINATES

DISCLAIMER

magicGNSS is an online service provided by GMV for registered users. You can apply for a free account at magicgnss.gmv.com. Using magicGNSS implies that you accept these Terms of Use. You may not disclose your account's username and password information to third parties. GMV does not provide any guarantee, express or implied, or assume any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness or usefulness of the products generated by magicGNSS. Use of these products is the sole responsibility of the user. Results obtained using the products generated by magicGNSS can be freely included in any publication provided you also include an explicit and clear reference to GMV and to the magicGNSS web site (magicgnss.gmv.com). magicGNSS uses data and products from the International GNSS Service (IGS) under the terms outlined at <http://igsceb.jpl.nasa.gov/faqs.html#id2839737>. Please also include in any resulting publication a citation as requested by IGS on their website. magicGNSS also uses data from the free ocean tide loading provider: <http://www.oso.chalmers.se/~loading>, Chalmers University of Technology, Onsala Space Observatory, Sweden. For any question or doubt contact us at magicgnss@gmv.com.

GMV AEROSPACE AND DEFENCE S.A.U.

Isaac Newton 11 P.T.M. Tres Cantos - 28760 Madrid - Spain

Tel.: +34 91 807 21 00 Fax: +34 91 807 21 99

www.gmv.com



Post-Processing Service Based on RTX Technology

TrimbleRTX.com

Contributor: jalexorduna@gmail.com
Reference Name: bogt1840.19o
Upload Date: 08/26/2019 01:12:05 UTC

Report Time Frame:
Start Time: 07/03/2019 00:00:00 UTC
End Time: 07/03/2019 23:59:30 UTC
Observation File Type(s): RINEX
Observation File(s): bogt1840.19o
Antenna:
Name: JAVRINGANT_DM NONE
Height: 0.061 m
Reference: Bottom of antenna mount
Receiver Name: JAVAD TRE_3 DELTA
Coordinate Systems: ITRF2014
Tectonic Plate: South America (Auto-detected)
Tectonic Plate Model: MORVEL56
Processing Interval: 30 s

Statistics

# Total Obs	# Usable Obs	# Used Obs	Percent
2880	2880	2876	99

Used Satellites

# Total Satellites:	53
GPS:	G01 G02 G03 G05 G06 G07 G08 G09 G10 G11 G12 G13 G14 G15 G16 G17 G18 G19 G20 G21 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30 G31 G32
GLONASS:	R01 R02 R03 R04 R05 R07 R08 R09 R10 R11 R13 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20 R21 R22 R23 R24

Processing Results

ITRF2014 at Epoch 2010.0		
Coordinate	Value	σ
X	1744398.934 m	0.008 m
Y	-6116037.029 m	0.008 m
Z	512731.836 m	0.002 m
Latitude	04° 38' 24.26723" N	0.002 m
Longitude	74° 04' 51.38096" W	0.008 m
El. Height	2576.249 m	0.008 m

ITRF2014 at Epoch 2019.50		
Coordinate	Value	σ
X	1744398.884 m	0.008 m
Y	-6116037.037 m	0.008 m
Z	512731.902 m	0.002 m
Latitude	04° 38' 24.26940" N	0.002 m
Longitude	74° 04' 51.38261" W	0.008 m
El. Height	2576.249 m	0.008 m

Report Information

Trimble RTX Solution ID: 21722874
Solution Type: Static
Software Version: 6.1.4.17185
Creation Date: 08/26/2019 01:14:17 UTC

Disclaimer

Trimble Navigation Limited does not guarantee availability, reliability, and performance of the current RTX Post-Processing service and accepts no legal liability arising from, or connected to, the use of information on this document or use of this service.

AUSPOS GPS Processing Report

August 27, 2019

This document is a report of the GPS data processing undertaken by the AUSPOS Online GPS Processing Service (version: AUSPOS 2.3) . The AUSPOS Online GPS Processing Service uses International GNSS Service (IGS) products (final, rapid, ultra-rapid depending on availability) to compute precise coordinates in International Terrestrial Reference Frame (ITRF) anywhere on Earth and Geocentric Datum of Australia (GDA) within Australia. The Service is designed to process only dual frequency GPS phase data.

An overview of the GPS processing strategy is included in this report.

Please direct any correspondence to geodesy@ga.gov.au

Geoscience Australia
Cnr Jerrabomberra and Hindmarsh Drive
GPO Box 378, Canberra, ACT 2601, Australia
Freecall (Within Australia): 1800 800 173
Tel: +61 2 6249 9111. Fax +61 2 6249 9929
Geoscience Australia
Home Page: <http://www.ga.gov.au>



1 User Data

All antenna heights refer to the vertical distance from the Ground Mark to the Antenna Reference Point (ARP).

Station (s)	Submitted File	Antenna Type	Antenna Height (m)	Start Time	End Time
BOGT	bogt1840.19o	NONE NONE	0.061	2019/07/03 00:00:00	2019/07/03 23:59:30

2 Processing Summary



Date	User Stations	Reference Stations	Orbit Type
2019/07/03 00:00:00	BOGT	BARH BRAZ BRMU CHPI CORD GLPS GODE MANA MDO1 SALU SANT SAVO SSIA WDC5 WES2	IGS final

3 Computed Coordinates, ITRF2014

All coordinates are based on the IGS realisation of the ITRF2014 reference frame. All the given ITRF2014 coordinates refer to a mean epoch of the site observation data. All coordinates refer to the Ground Mark.

3.1 Cartesian, ITRF2014

Station	X (m)	Y (m)	Z (m)	ITRF2014 @
BOGT	1744398.888	-6116037.028	512731.902	03/07/2019
BARH	1693644.615	-4239067.590	4439567.310	03/07/2019
BRAZ	4115014.069	-4550641.633	-1741443.778	03/07/2019
BRMU	2304703.278	-4874817.169	3395187.051	03/07/2019
CHPI	4164613.907	-4162456.978	-2445028.638	03/07/2019
CORD	2345503.859	-4910842.906	-3316365.222	03/07/2019
GLPS	-33800.918	-6377516.517	-82154.231	03/07/2019
GODE	1130773.529	-4831253.581	3994200.466	03/07/2019
MANA	407981.945	-6222925.649	1333529.095	03/07/2019
MDO1	-1329998.957	-5328393.365	3236504.089	03/07/2019
SALU	4566947.832	-4443098.533	-286674.554	03/07/2019
SANT	1769693.439	-5044574.286	-3468320.886	03/07/2019
SAVO	4870283.753	-3864605.367	-1418872.379	03/07/2019
SSIA	95567.106	-6197785.571	1500590.601	03/07/2019
WDC5	1112158.634	-4842855.617	3985496.980	03/07/2019
WES2	1492233.021	-4458089.507	4296046.096	03/07/2019

3.2 Geodetic, GRS80 Ellipsoid, ITRF2014

Geoid-ellipsoidal separations, in this section, are computed using a spherical harmonic synthesis of the global EGM2008 geoid. More information on the EGM2008 geoid can be found at <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>.



Station	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Ellipsoidal Height(m)	Derived Above Geoid Height(m)
BOGT	4 38 24.26942	-74 04 51.38239	2576.241	2553.380
BARH	44 23 42.17592	-68 13 18.09507	6.752	31.500
BRAZ	-15 56 50.90323	-47 52 40.33063	1106.004	1118.594
BRMU	32 22 13.43981	-64 41 46.58993	-11.644	20.805
CHPI	-22 41 13.71861	-44 59 06.57204	617.426	620.803
CORD	-31 31 42.36060	-64 28 12.17578	746.822	720.434
GLPS	-0 44 34.79277	-90 18 13.19585	1.775	5.354
GODE	39 01 18.22125	-76 49 36.59740	14.499	47.764
MANA	12 08 56.18273	-86 14 56.37454	71.013	66.405
MDO1	30 40 49.83773	-104 00 53.98164	2004.490	2026.569
SALU	-2 35 36.44578	-44 12 44.92658	18.944	44.209
SANT	-33 09 01.03471	-70 40 06.79921	723.102	695.199
SAVO	-12 56 21.28047	-38 25 56.11575	76.314	87.235
SSIA	13 41 49.50776	-89 06 59.74015	626.636	625.208
WDC5	38 55 14.03297	-77 03 58.74632	58.980	91.845
WES2	42 36 48.01095	-71 29 35.98669	85.014	113.641

3.3 UTM Grid, GRS80 Ellipsoid, ITRF2014

Station	East (m)	North (m)	Zone	Ellipsoidal Height (m)	Derived Above Geoid Height(m)
BOGT	601939.813	512945.074	18	2576.241	2553.380
BARH	561984.583	4916046.113	19	6.752	31.500
BRAZ	191901.147	8234747.585	23	1106.004	1118.594
BRMU	340415.193	3582757.915	20	-11.644	20.805
CHPI	501524.421	7491112.541	23	617.426	620.803
CORD	360433.084	6510895.564	20	746.822	720.434
GLPS	800120.969	9917784.727	15	1.775	5.354
GODE	341854.141	4320775.454	18	14.499	47.764
MANA	581710.936	1343135.884	16	71.013	66.405
MDO1	594348.846	3394609.186	13	2004.490	2026.569
SALU	587544.909	9713315.870	23	18.944	44.209
SANT	344386.393	6330812.702	19	723.102	695.199
SAVO	561582.964	8569514.654	24	76.314	87.235
SSIA	271084.554	1515227.415	16	626.636	625.208
WDC5	320865.705	4309991.434	18	58.980	91.845
WES2	295497.654	4720891.531	19	85.014	113.641



3.4 Positional Uncertainty (95% C.L.) - Geodetic, ITRF2014

Station	Longitude(East) (m)	Latitude(North) (m)	Ellipsoidal Height(Up) (m)
BOGT	0.006	0.005	0.015
BARH	0.005	0.004	0.010
BRAZ	0.006	0.004	0.008
BRMU	0.005	0.004	0.008
CHPI	0.006	0.004	0.009
CORD	0.006	0.005	0.012
GLPS	0.006	0.005	0.012
GODE	0.005	0.004	0.008
MANA	0.006	0.004	0.011
MDO1	0.006	0.004	0.011
SALU	0.006	0.004	0.010
SANT	0.006	0.005	0.011
SAVO	0.006	0.003	0.008
SSIA	0.006	0.003	0.009
WDC5	0.005	0.004	0.010
WES2	0.005	0.004	0.010

4 Ambiguity Resolution - Per Baseline

Baseline	Ambiguities Resolved	Baseline Length (km)
WDC5 - WES2	86.7 %	623.652
SALU - SAVO	83.3 %	1307.111
MANA - SSIA	67.7 %	355.168
CHPI - CORD	52.1 %	2151.388
BRAZ - CHPI	95.5 %	805.096
BRMU - WDC5	86.0 %	1331.033
MDO1 - SSIA	36.4 %	2408.626
BARH - WDC5	88.7 %	953.345
BRMU - SAVO	39.1 %	5547.783
GODE - WDC5	86.7 %	23.598
BRMU - SSIA	42.6 %	3196.877
BRAZ - SAVO	93.3 %	1070.108
BOGT - SSIA	84.4 %	1923.849
GLPS - SSIA	81.3 %	1598.162
CORD - SANT	82.2 %	610.354
AVERAGE	73.7%	1593.743

Please note for a regional solution, such as used by AUSPOS, ambiguity resolution success rate of 50% or better for a baseline formed by a user site indicates a reliable solution.

5 Computation Standards

5.1 Computation System

Software	Bernese GNSS Software Version 5.2.
GNSS system(s)	GPS only.

5.2 Data Preprocessing and Measurement Modelling

Data preprocessing	Phase preprocessing is undertaken in a baseline by baseline mode using triple-differences. In most cases, cycle slips are fixed by the simultaneous analysis of different linear combinations of L1 and L2. If a cycle slip cannot be fixed reliably, bad data points are removed or new ambiguities are set up. A data screening step on the basis of weighted postfit residuals is also performed, and outliers are removed.
Basic observable	Carrier phase with an elevation angle cutoff of 7° and a sampling rate of 3 minutes. However, data cleaning is performed at a sampling rate of 30 seconds. Elevation dependent weighting is applied according to $1/\sin(e)^2$ where e is the satellite elevation.
Modelled observable	Double differences of the ionosphere-free linear combination.
Ground antenna phase centre calibrations	IGS14 absolute phase-centre variation model is applied.
Tropospheric Model	A priori model is the GMF mapped with the DRY-GMF.
Tropospheric Estimation	Zenith delay corrections are estimated relying on the WET-GMF mapping function in intervals of 2 hours. N-S and E-W horizontal delay parameters are solved for every 24 hours.
Tropospheric Mapping Function	GMF
Ionosphere	First-order effect eliminated by forming the ionosphere-free linear combination of L1 and L2. Second and third order effects applied.
Tidal displacements	Solid earth tidal displacements are derived from the complete model from the IERS Conventions 2010, but ocean tide loading is not applied.
Atmospheric loading	Applied
Satellite centre of mass correction	IGS14 phase-centre variation model applied
Satellite phase centre calibration	IGS14 phase-centre variation model applied
Satellite trajectories	Best available IGS products.
Earth Orientation	Best available IGS products.

5.3 Estimation Process

Adjustment	Weighted least-squares algorithm.
Station coordinates	Coordinate constraints are applied at the Reference sites with standard deviation of 1mm and 2mm for horizontal and vertical components respectively.
Troposphere	Zenith delay parameters and pairs of horizontal delay gradient parameters are estimated for each station in intervals of 2 hours and 24 hours.
Ionospheric correction	An ionospheric map derived from the contributing reference stations is used to aid ambiguity resolution.
Ambiguity	Ambiguities are resolved in a baseline-by-baseline mode using the Code-Based strategy for 180-6000km baselines, the Phase-Based L5/L3 strategy for 18-200km baselines, the Quasi-Ionosphere-Free (QIF) strategy for 18-2000km baselines and the Direct L1/L2 strategy for 0-20km baselines.

5.4 Reference Frame and Coordinate Uncertainty

Terrestrial reference frame	IGS14 station coordinates and velocities mapped to the mean epoch of observation.
Australian datums	GDA2020 and GDA94.
Derived AHD	For stations within Australia, AUSGeoid2020 (V20180201) is used to compute AHD. AUSGeoid2020 is the Australia-wide gravimetric quasigeoid model that has been a posteriori fitted to the AHD. For reference, derived AHD is always determined from the GDA2020 coordinates. In the GDA94 section of the report, AHD values are assumed to be identical to those derived from GDA2020.
Above-geoid heights	Earth Gravitational Model EGM2008 released by the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM Development Team is used to compute above-geoid heights. This gravitational model is complete to spherical harmonic degree and order 2159, and contains additional coefficients extending to degree 2190 and order 2159.
Coordinate uncertainty	Coordinate uncertainty is expressed in terms of the 95% confidence level for GDA94, GDA2020 and ITRF2014. Uncertainties are scaled using an empirically derived model which is a function of data span, quality and geographical location.