



**Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo
de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022**

Cervantes Domínguez, Fernando David e Imbaquingo Cadena, James Steward

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniería Geográfica y del Medio
Ambiente

Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD

4 de agosto del 2022



| TESIS_SOLUCIONES_SEMANALES.pdf

Scanned on: 16:43 August 15, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

| | |
|--------------------------|----|
| Identical Words | 20 |
| Words with Minor Changes | 89 |
| Paraphrased Words | 78 |
| Omitted Words | 0 |



Website | Education | Businesses

Firma:

.....
Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio

Director



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022”** fue realizado por los señores **Cervantes Domínguez, Fernando David e Imbaquingo Cadena, James Steward**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de septiembre del 2022

Firma:

.....
Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD

C. C: 1102596044



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cervantes Domínguez, Fernando David e Imbaquingo Cadena, James Steward**, con cédulas de ciudadanía n°1716201155 y n°1726743311, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 15 de septiembre del 2022

Firma:

Cervantes Domínguez, Fernando David

C.C.: 1716201155

Firma:

Imbaquingo Cadena, James Steward

C.C.: 1726743311



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Autorización de Publicación

Nosotros, **Cervantes Domínguez, Fernando David e Imbaquingo Cadena, James Steward**, con cédulas de ciudadanía n°1716201155 y n°1726743311, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 15 de septiembre del 2022

Firma:

Firma:

Cervantes Domínguez, Fernando David

C.C.: 1716201155

Imbaquingo Cadena, James Steward

C.C.: 1726743311

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado:

De manera muy especial a mi madre Elizabeth, que día a día con esfuerzo y sacrificio ha logrado sacarme adelante, quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez, aprendí de sus valores, sus malas noches, sus ganas de darlo todo, su humildad y su tenacidad, que es lo más importante que siempre llevare en mi corazón y en mi vida profesional.

A mi tía Gina que fue un pilar muy importante para el culmino de esta carrera, por creer en mí y apoyarme incondicionalmente siempre.

A mis mejores amigos Vinicio, Irwiin, Jaime, Cristian y Mauricio, por jamás dejarme solo, siempre estar ahí, para lo que necesite. Gracias por su cariño y por ayudarme a entender el significado de hermandad.

A todos los amigos que logre en la universidad, Daider, Fernando, Andrea, Jessenia, Mishell y Paul, por ser amigos incondicionales.

Y no me puedo ir sin antes decirles, que sin ustedes mi lado no lo hubiera logrado, espero que este momento perdure en el tiempo, no solo en la mente de las personas a quienes mencione, sino también a quien invirtieron su tiempo en aportar con conocimientos y apoyo a este proyecto de tesis, a ellos así mismo les agradezco.

Dedicatoria

A mí madre Jacqueline y a mí padre Hugo, que son los pilares de mi vida, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente desde que tengo memoria y los que siempre han dado todo su esfuerzo y tiempo para educarme y darme un mejor presente y futuro.

A mi hermano Miguel y hermana Danna, las fuentes de mi alegría, las razones por las que siempre deseo superarme y crecer como persona y profesional para darles un modelo a seguir.

A todos los amigos que hice antes y durante la carrera, esos amigos que viven en cada una de las memorias gratificantes de este capítulo de mi vida.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por ser nuestro guía durante toda nuestra vida universitaria, por ser el pilar y la fuerza en esta dura etapa. De su mano hemos salido adelante, ya que él nos ha librado de enfermedades y peligros, lo cual nos ha permitido esforzarnos cada día en nuestra meta y así poder terminar nuestros estudios.

Dicen que la mejor herencia que nos pueden dejar los padres son los estudios, sin embargo, no creemos que sea el único legado del cual particularmente nos sentimos muy agradecidos, nuestros padres nos han permitido trazar nuestro camino y caminar con nuestros propios pies. Ellos son nuestros pilares de la vida, les dedicamos este trabajo de titulación.

Gracias al Dr. Marco Luna por ser la guía de este proyecto, porque sus enseñanzas se ven plasmadas en el mismo.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en especial a todos los profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, porque sus valiosas enseñanzas tanto académicas como personales, han contribuido en nuestra formación personal y profesional.

Índice de Contenido

| | |
|--|----|
| Copyleaks | 2 |
| Certificación | 3 |
| Responsabilidad de Autoría | 4 |
| Autorización de Publicación | 5 |
| Dedicatoria..... | 6 |
| Agradecimientos | 8 |
| Resumen | 16 |
| Abstract | 17 |
| Capítulo I: Introducción | 18 |
| Antecedentes | 18 |
| Planteamiento del Problema..... | 19 |
| Justificación e Importancia | 19 |
| Alcance | 20 |
| Objetivo General | 21 |
| Objetivos Específicos | 21 |
| Capítulo II: Marco Teórico..... | 22 |
| Sistema de Referencia y Marco de Referencia | 22 |
| Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS)..... | 23 |
| Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) | 23 |
| Sistema Internacional de Referencia Celeste..... | 24 |
| SIRGAS | 25 |
| El Servicio Internacional GNSS (IGS) | 27 |
| Sistema Global de Navegación por Satélite - GNSS | 28 |
| Global Positioning System (GPS) | 31 |
| RINEX..... | 32 |
| Estructura de los archivos de Observación | 33 |
| SINEX..... | 38 |
| Efemérides GPS | 39 |
| Productos de reloj (CLK)..... | 42 |
| Funciones de Mapeo Troposféricas (GMF, VMF)..... | 45 |
| Software Bernese 5.2 | 47 |
| Posicionamiento Preciso de Punto (PPP) | 48 |
| Programas utilizados en el preprocesamiento de los productos GNSS..... | 51 |
| GFZRNX German Research Centre for Geosciences..... | 51 |
| Notepad ++. | 51 |

| | |
|--|-----|
| | 10 |
| RNXCMP (Hatanaka-formato de compresión)..... | 51 |
| Capítulo III: Metodología..... | 52 |
| Procesamiento de datos GNSS..... | 52 |
| Descarga y tratamiento de datos GNSS..... | 53 |
| Selección de las Estaciones de monitoreo continuo de la REGME..... | 53 |
| Selección de las Estaciones fiduciales..... | 54 |
| Recopilación de archivos GNSS..... | 56 |
| RINEX..... | 56 |
| Efemérides y relojes precisos..... | 59 |
| Procesamiento en el Software Bernese 5.2..... | 60 |
| Estructura del Directorio..... | 60 |
| Estructura del Programa..... | 61 |
| Preparación de la campaña..... | 64 |
| Preparación de los archivos de entrada para el procesamiento..... | 66 |
| BPE (Bernese Processing Engine)..... | 73 |
| Definición del Process Control File (PCF)..... | 73 |
| Preprocesamiento de archivos en Bernese..... | 75 |
| Procesamiento PPP en Bernese..... | 78 |
| Transformación de ITRF..... | 80 |
| Capítulo IV: Resultados y Análisis..... | 82 |
| Resultados generales del procesamiento de soluciones semanales de la red de monitoreo continuo del Ecuador REGME..... | 82 |
| Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides finales de la estación EPEC..... | 83 |
| Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas finales..... | 87 |
| Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides rápidas de la estación EPEC..... | 91 |
| Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas rápidas..... | 95 |
| Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides ultrarrápidas de la estación EPEC..... | 99 |
| Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas ultrarrápidas..... | 103 |
| Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de órbita final en el software Bernese..... | 107 |
| Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de órbita rápida en el software Bernese..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de orbita ultrarrápida en el software Bernese | 112 |
| Resumen de Tiempos y RMSE del procesamiento de las soluciones semanales..... | 115 |
| Transformación de ITRF2014 a IRTF2020 | 117 |
| Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones..... | 118 |
| Conclusiones..... | 118 |
| Recomendaciones..... | 119 |
| Bibliografía..... | 122 |
| Apéndices..... | 130 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Frecuencias y señales de las principales constelaciones GNSS | 30 |
| Tabla 2 Partes de la cabecera de un archivo de observación RINEX..... | 34 |
| Tabla 3 Partes de la cabecera de un archivo de observación RINEX (continuación)..... | 35 |
| Tabla 4 Partes de la sección de datos de un archivo de observación RINEX..... | 36 |
| Tabla 5 Precisión, latencia, intervalo de muestra y actualización de los productos de efemérides precisos..... | 41 |
| Tabla 6 Precisión, latencia, intervalo de muestra y actualización de los productos de reloj precisos..... | 43 |
| Tabla 7 Partes de la cabecera de un archivo de reloj..... | 45 |
| Tabla 8 26 estaciones de monitoreo continuo del Ecuador seleccionados para el procesamiento de soluciones semanales..... | 53 |
| Tabla 9 20 estaciones fiduciales de la red SIRGAS-CON..... | 55 |
| Tabla 10 Archivos generales del servidor ftp CODE (Center for Orbit Determination in Europe) utilizadas en el procesamiento Bernese..... | 66 |
| Tabla 11 Descripción de los principales directorios de una campaña de procesamiento..... | 68 |
| Tabla 12 Descripción de los programas que se usaron en el preprocesamiento para obtener soluciones semanales en Bernese..... | 76 |
| Tabla 13 Descripción de los programas que se usaron en el procesamiento para obtener las soluciones semanales en Bernese..... | 79 |
| Tabla 14 Parámetros de transformación de ITRF2014 a ITRF2020..... | 81 |
| Tabla 15 Número de días totales recopiladas por cada estación de la REGME..... | 82 |
| Tabla 16 Soluciones semanales procesadas con efemérides finales comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 85 |
| Tabla 17 Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides finales..... | 88 |
| Tabla 18 Soluciones semanales procesadas con efemérides rápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 19 Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides rápidas..... | 96 |
| Tabla 20 Soluciones semanales procesadas con efemérides ultrarrápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 101 |
| Tabla 21 Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides ultrarrápidas..... | 103 |
| Tabla 22 RMSE de los componentes horizontal (Este y Norte) y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides finales..... | 107 |
| Tabla 23 Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides finales..... | 108 |
| Tabla 24 RMSE de los componentes horizontal y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides rápidas..... | 110 |
| Tabla 25 Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides rápidas..... | 111 |
| Tabla 26 RMSE de los componentes horizontal y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides ultrarrápidas..... | 113 |
| Tabla 27 Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides ultrarrápidas..... | 113 |
| Tabla 28 Resumen de los tiempos de cada procesamiento..... | 116 |
| Tabla 29 Resumen de los RMSE de cada procesamiento..... | 116 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Las realizaciones de SIRGAS y su densificación en las Américas..... | 26 |
| Figura 2 Ejemplo de una cabecera de un archivo de observación RINEX..... | 33 |
| Figura 3 Ejemplo de una cabecera de un archivo de observación RINEX (continuación)..... | 35 |
| Figura 4 Ejemplo de una cabecera de un archivo de observación RINEX (continuación)..... | 36 |
| Figura 5 Bloques de un archivo SINEX..... | 38 |
| Figura 6 Códigos de precisión de las efemérides (archivos SP3)..... | 42 |
| Figura 7 Ejemplo de la cabecera de un archivo de reloj..... | 44 |
| Figura 8 Instituciones alrededor del mundo afiliados al software GNSS Bernese..... | 47 |
| Figura 9 Descripción gráfica del posicionamiento absoluto típico..... | 49 |
| Figura 10 Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador..... | 54 |
| Figura 11 Ubicación de las estaciones fiduciales de la red SIRGAS-CON | 56 |
| Figura 12 Script para descomprimir la doble compresión (ZIP+Hatanaka)..... | 57 |
| Figura 13 Script para filtrar información GPS..... | 58 |
| Figura 14 Comparación de peso de un archivo de observación mixta y de observación GPS..... | 58 |
| Figura 15 Script para modificar la cabecera y eliminar información de los archivos de orbitas ultrarrápidas (IGU)..... | 59 |
| Figura 16 Directorios que conforman el software científico Bernese versión 5.2..... | 60 |
| Figura 17 Pantalla Principal del Programa Bernese Versión 5.2..... | 61 |
| Figura 18 Diagrama de flujo funcional de un procesamiento estándar en Bernese GNSS Software Versión 5.2..... | 63 |
| Figura 19 Pasos para la creación de una campaña en el software Bernese..... | 65 |
| Figura 20 Cuadro de diálogo para definir la fecha de procesamiento (día o semana GPS).. | 65 |
| Figura 21 Estructura de los directorios de cada campaña a procesar..... | 67 |
| Figura 22 Script para unificar los archivos diarios para la Vienna Mapping Function (VMF). | 72 |
| Figura 23 Archivo de Control de Procesos (PCF)..... | 74 |
| Figura 24 Lista de programas utilizadas en el BPE para el preprocesamiento..... | 75 |
| Figura 25 Lista de programas utilizadas en el BPE para el procesamiento..... | 78 |
| Figura 26 Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides finales comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27 Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides rápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 95 |
| Figura 28 Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides ultrarrápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC..... | 103 |
| Figura 29 Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides finales)..... | 109 |
| Figura 30 Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides rápidas)..... | 111 |
| Figura 31 Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides ultrarrápidas)..... | 114 |

Resumen

Las aplicaciones de redes geodésicas de estaciones de monitoreo permanente son diversas, pero en general son la base para estudios en diferentes escalas de la superficie terrestre. En el presente proyecto de investigación se obtienen las soluciones semanales o coordenadas semanales de las estaciones activas de la red GNSS del Ecuador REGME de un período de tiempo de 4 meses. El procesamiento de las observaciones GNSS debe ser lo más real y confiable posible, por lo que se utiliza el software científico Bernese versión 5.2 para realizar dicho procesamiento. A diferencia de otros softwares de carácter comercial, el Bernese es un software de procesamiento de datos multi-GNSS de alta precisión y desempeño capaz de mantener un control detallado sobre todas sus opciones de procesamiento además de incluir herramientas para su automatización. De igual manera, el estudio se enfoca en determinar el tiempo de procesamiento y nivel de precisión de las soluciones semanales utilizando efemérides/órbitas finales, rápidas y ultrarrápidas. Es fundamental para este tipo de estudio la recopilación y tratamiento de los insumos de entrada para el procesamiento de las coordenadas mediante la metodología de posicionamiento de punto preciso (PPP) para alcanzar una precisión real y confiable. Finalmente, se realiza el análisis de las 18 soluciones semanales obtenidas por cada tipo de efemérides procesado con la realización de SIRGAS de la semana correspondiente. Mediante la estadística descriptiva se determina que el procesamiento a partir de las efemérides precisas finales tiene menor diferencia en ΔX , ΔY & ΔZ y por ende dichas coordenadas semanales son de mayor precisión.

Palabras Claves: Soluciones Semanales, Software Científico Bernese, Efemérides, Posicionamiento de Punto Preciso.

Abstract

The applications of geodesic networks of permanent monitoring stations are diverse, but in general they are the basis for studies at different scales of the Earth's surface. In the present research weekly solutions or weekly coordinates of the active stations of the GNSS network of Ecuador "REGME" are obtained for a period of 4 months. The processing of GNSS observations must be as reliable as possible, so Bernese version 5.2 scientific software is used to perform such processing. Unlike other commercial software, Bernese is a high-precision and performance multi-GNSS data processing software capable of maintaining detailed control over all processing options as well as including tools for automation. Similarly, the study focuses on determining the processing time and level of accuracy of weekly solutions using final, rapid and ultra-rapid ephemeris/orbits. Fundamental to this type of study is the compilation and treatment of the input data for coordinate processing as it uses the precise point positioning (PPP) methodology to achieve reliable accuracy. Finally, the analysis of the 18 weekly solutions obtained for each type of ephemeris processed with SIRGAS solutions of the corresponding week. Descriptive statistics determine that the processing using final precise ephemeris has a minor difference in ΔX , ΔY & ΔZ and therefore these weekly coordinates are more precise.

Key Words: Weekly Solutions, Scientific Software Bernese, Ephemeris, Precise Point Positioning

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

En la actualidad con el desarrollo de las nuevas tecnologías y diferentes técnicas de posicionamiento satelital hacen que la geodesia reafirme su importancia asociada a fines científicos. Además, que los estudios geoespaciales son sumamente necesarios para la vigencia y mantenimiento de un marco de referencia geocéntrico nacional.

Las observaciones GNSS implementadas por una red satelital a gran escala se han transformado, convirtiéndose en sistemas complejos de comunicación y de datos. Dichos sistemas dotan a los usuarios (geodestas, topógrafos, investigadores y público en general) de un marco de referencia preciso, actualizable, con coordenadas y velocidades de las estaciones, y a su vez suministran datos GNSS para poder realizar mediciones precisas asociadas a dichas estaciones (Specht et al., 2011).

A partir del desarrollo e implementación de los sistemas de posicionamiento global por satélites (GNSS) como GPS y GLONASS, se lleva a cabo un mejor ajuste al momento de procesar y además permite obtener coordenadas de cualquier punto sobre la tierra. Por tal motivo, nace el Procesamiento de Punto Preciso (PPP) a finales de la década de los 90s, dicho concepto se basa en la obtención de coordenadas procesando observaciones por fase y código mediante el uso de órbitas precisas de satélites (efemérides) y deltas de tiempo. El potencial sobre la metodología (PPP) es la capacidad de aprovechar los insumos al máximo corrigiendo y depurando los observables para determinar un punto sobre la tierra con una alta precisión (Taborda & Bernal, 2017).

Las medidas obtenidas con GNSS son ampliamente utilizadas en las investigaciones de fenómenos geofísicos, como por ejemplo la cuantificación de la deformación cortical y determinación del movimiento de las placas tectónicas, así como para la determinación de deformaciones asociadas a volcanes, ajuste isostático glacial y variaciones del nivel medio del mar (Petrovski & Tsujii, 2012).

En nuestro país se han realizado algunas investigaciones que utilizan observaciones GNSS para determinar campo de velocidades. En el 2011 varias entidades incluido el Instituto Geográfico Militar, ejecutaron el proyecto de investigación “Campo de Velocidades del Ecuador obtenido a través de mediciones de campañas GPS de los últimos 15 años y medidas de una red GPS permanente” (Cisneros & Nocquet, 2017). Otra aproximación lo realiza Luna (2017), el cual también define un modelo de velocidades a partir de datos GNSS.

Planteamiento del Problema

Las soluciones semanales SIRGAS son una combinación de resultados individuales de las estaciones de monitoreo continuo, captadas del sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), estas coordenadas son fundamentales para actividades geoespaciales, la obtención de dichas coordenadas no es de dificultad para el usuario, el problema es el tiempo en que dichos datos son habilitados para el público.

Las soluciones semanales proporcionadas por SIRGAS tienen un tiempo de demora de 2 meses aproximadamente en publicarse dado que se utilizan efemérides precisas las cuales se postergan de 12 a 18 días en conocerse y la abundante cantidad de datos que se deben procesar, teniendo un aproximado de 450 estaciones de procesar para las américas.

Estas soluciones semanales son de gran importancia, ya que para un trabajo geodésico es necesario partir de un punto de referencia conocido y que sea confiable, en nuestro caso son las estaciones de la REGME, donde los datos crudos son de acceso público y las soluciones semanales son otorgados por SIRGAS, por lo que es necesario acortar el tiempo de entrega de las coordenadas.

Justificación e Importancia

La Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó el marco de referencia geodésico para el desarrollo sostenible a nivel mundial en el 2015, reconociendo la importancia de tener un marco de referencia exacto y estable, que permita la interoperabilidad de las mediciones realizadas en cualquier lugar de la Tierra. El responsable del marco de

referencia en América Latina y el Caribe es SIRGAS, aplicó un intercambio abierto de datos geodésicos para la vigilancia del cambio climático, la gestión de peligros naturales y desastres, así como toda una serie de aplicaciones industriales, como la minería, la agricultura, el transporte, la navegación y la construcción, entre otras. Por esta razón es de vital importancia la divulgación de datos geoespaciales en un corto periodo de tiempo y con una buena confiabilidad, para poder contribuir con proyectos de desarrollo humano nacionales.

Es así que la propuesta de investigación está orientada con respecto al objetivo 9 (Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación) y objetivo 11 (Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles) de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estos objetivos hacen referencia a lo que se pretende lograr con la propuesta de investigación, ya que se pretende conseguir soluciones semanales que por consiguiente vienen a ser las coordenadas geocéntricas que reflejan la posición real de cada estación de monitoreo continuo de cada semana. Por lo tanto, estas soluciones tienen aplicabilidad práctica y científica.

El Ecuador es además un país que está ubicado en zonas de gran actividad tectónica, sísmica y volcánica que gracias a sus efectos provocan grandes distorsiones y deformaciones de la corteza terrestre. Todos estos efectos se aprecian al comparar las coordenadas geográficas entre épocas pre-sísmicas y post-sísmicas. Por lo mencionado anteriormente, es necesario actualizar el marco de referencia geodésico para el Ecuador, con el fin de homologar la información geodésica-cartográfica presente en otras investigaciones y estudios. Es así que se muestra la necesidad de precisar soluciones semanales de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME que servirá de apoyo para otras investigaciones en el campo geoespacial.

Alcance

El proyecto de investigación en desarrollo se realizará mediante la utilización de las observaciones disponibles de la Red GNSS de Monitoreo Continuo de Ecuador - REGME. La REGME actualmente cuenta con 33 estaciones cuya distribución cubre el 95% del territorio

nacional. Además, la REGME forma también parte de la red SIRGAS (SIRGAS - CON), generando productos diarios de 24 horas en formato RINEX con un intervalo de grabación de 30 segundos (Cisneros Revelo, 2020).

La República del Ecuador se encuentra situada entre los paralelos $1^{\circ} 30.0'$ N. y $03^{\circ} 23.5'$ S., y los meridianos $75^{\circ} 12.0'$ W. y $81^{\circ} 00.0'$ W., sin incluir el Archipiélago de Galápagos. Al norte del Ecuador limita el país con Colombia, teniendo en la costa como límite natural el Río Mataje. Por el sur Ecuador limita sus fronteras con Perú desde la costa del Archipiélago de Jambelí; por la Boca de Capones, siguiendo por el Estero Grande hasta llegar a la desembocadura del río Zarumilla y continuando por éste, tierra adentro. Y al oeste con el Océano Pacífico (Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 2005).

Objetivo General

- Obtener las soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022.

Objetivos Específicos

- Procesar las observaciones de las estaciones GNSS pertenecientes a la REGME en el software científico Bernese 5.2, mediante la recopilación de información existente, creación y preparación de datos para el procesamiento de una campaña para la obtención de soluciones semanales.
- Obtener las coordenadas semanales de las estaciones de monitoreo continuo de la red REGME utilizando efemérides ultrarrápidas.
- Obtener las coordenadas semanales de las estaciones de monitoreo continuo de la red REGME utilizando efemérides rápidas.
- Obtener las coordenadas semanales de las estaciones de monitoreo continuo de la red REGME utilizando efemérides finales.
- Comparar las coordenadas del resultado obtenido con efemérides ultra rápidas, rápidas y finales.
- Comparar los tiempos de recopilación y procesamiento de las efemérides ultra rápidas, rápidas y finales.

Capítulo II: Marco Teórico

Sistema de Referencia y Marco de Referencia

Los Sistemas de Referencias sirven como base para la representación geométrica de la superficie terrestre y como esta varía en el tiempo, es decir que en un principio es una representación tridimensional, añadiendo una cuarta dimensión que es el tiempo, donde se representa los movimientos que sufre la tierra por sus deformaciones y el movimiento de los cuerpos celestes (Valverde, 2020).

El Sistema de Referencia están definidos en términos de métrica, orientación y curvatura, solo en la base matemática es decir al conjunto de parámetros, modelos, estándares, constantes, que sirvan para la representación de cantidades geométricas y físicas, es muy común confundir el sistema de referencia con el marco de referencia, pero este es la materialización del sistema de referencia (Moya Zamora, 2017).

Un Marco de Referencia proporciona un conjunto de coordenadas de algunos puntos ubicados en la superficie de la tierra (Soycan Metin, 2017), la cual contempla dos partes, la física que es la materialización sólida del sistema por medio de puntos y la matemática que son los parámetros como las coordenadas (Jekeli, 2012), en estudios geodésicos es un componente extremadamente importante que requiere una alta precisión.

Ecuador adoptó en el año 1992 un sistema de referencia, sobre la cual se desarrollan todas las actividades cartográficas, sin embargo con los avances tecnológicos y las necesidades requeridas por los usuarios el Instituto Geográfico Militar (IGM) se vio obligado a cambiar de sistema de referencia para que sea compatible con las nuevas tecnologías satelitales, adoptando a SIRGAS como sistema de referencia en el año 2002 llamándolo SIRGAS - ECUADOR cuya realización es la siguiente (Zurita, 2000):

- El Marco de referencia es SIRGAS 95 ITRF94.
- La época de referencia es 1995.4.
- El elipsoide GRS 80.

El 16 de abril del 2016 se produjo un evento sísmico de 7.8 en la zona de Pedernales y Cojimíes en la Provincia de Manabí, donde hubo un desplazamiento de coordenadas en varias estaciones de monitoreo continuo y cuya realización se cambió a (IGM,2020):

- El Marco de referencia es ITRF2008.
- La época de referencia es 2016.43.
- El elipsoide GRS 80.

Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS)

El Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) es un sistema espacial global de referencia centrado en la Tierra, fijo con su origen en el centro de masa de la Tierra (Karbon et al., 2018). Es un sistema terrestre ecuatorial cartesiano geocéntrico que consiste de un conjunto de preceptos y convenciones al igual de un modelado necesario para definir el origen, escala, orientación y su evolución en el tiempo. Dicho sistema tiene como objetivo la representación en un mismo sistema de referencia las coordenadas de cualquier punto sobre la superficie terrestre (Martín, 2020). El ITRS (International Terrestrial Reference System), por sus siglas en inglés, considera los siguientes criterios:

- El origen es el centro de masa del planeta, es decir, el geocentro incluyendo la atmósfera y la hidrósfera.
- No depende de la figura elipsoidal.
- El eje Z apunta hacia el polo terrestre medio y coincide con el eje de rotación.
- La orientación fue inicialmente dada por la orientación del Bureau International de l'Heure (BIH) en 1984.0

La realización de este sistema se denomina Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF).

Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF)

El ITRF por sus siglas en inglés (International Terrestrial Reference Frame), representa la materialización del ITRS. Es un marco de referencia geocéntrico global 3D realizado a través de coordenadas de época de referencia y velocidades lineales de un conjunto de puntos en la superficie de la Tierra que sirven como puntos de referencia,

establecido y mantenido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) (Karbon et al., 2018). La realización convencional actual es el ITRF2014 y su realización más reciente el ITRF2020.

El sistema que materializa posee su origen en el centro de masa de la Tierra, incluyendo los océanos y la atmósfera. Su unidad de longitud es el metro (SI), definido en un marco terrestre local en el sentido de la teoría relativista de la gravitación y con su orientación de sus ejes tal como estableció la BIH en 1984 (Furonés, 2011):

- Eje Z: Polo medio determinado por la IERS y llamado IERS Reference Pole (IRP) o Convencional Terrestrial Pole (CTP).
- Eje X: Meridiano de Greenwich Convencional determinado por la IERS y llamado IERS Reference Meridian (IRM) o Greenwich Mean Origin (GMO).
- Eje Y: Formando una tripleta dextrógira con los ejes anteriores sobre el plano del ecuador convencional.

La implementación del marco está formada por coordenadas cartesianas y velocidades de una serie de estaciones equipadas con técnicas geodésicas espaciales (VLBI, SLR, LLR, GPS desde 1991 y DORIS desde 1994). Las soluciones del ITRF se vienen dando desde 1984, a partir de ahí se han obtenido las realizaciones 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 2000, 2005, 2008, 2014 y la más reciente en 2020.

Sistema Internacional de Referencia Celeste

El análisis de las observaciones geodésicas espaciales requiere la definición de un marco de referencia cuasi inercial al que se pueda vincular la orientación. Por esta razón, la Unión Astronómica Internacional (IAU) adoptó el sistema internacional de referencia celeste (ICRS) quien reemplazó al catálogo FK5, basados en las observaciones de interferometría de líneas base muy largas, VLBI en su acrónimo en inglés, la cual realizó un marco internacional de referencia celeste (ICRF) (Lambert, 2013). La realización actualizada es el segundo Marco Internacional de Referencia Celestial (ICRF2) compuesta con 3414 coordenadas precisas y de un conjunto de 295 fuentes de radio extragalácticas (LIU, 2017).

El Marco Internacional de Referencia Celestial desempeña un papel muy importante en estudios geodésicos para la estimación de la orientación de la tierra, modelos para la rotación de la tierra, nomenclaturas y escalas de tiempo. Es importante mencionar que el IERS, es el encargado de medir y proporcionar los valores para la rotación de la tierra basándose con los datos internacionales (IVS, ILRS, IGS, IDS), el IVS se deriva de fuentes de radio extragalácticas, para el ILRS con el alcance láser en satélites artificiales y la luna, para los datos IGS con observaciones con sistemas GNSS y observaciones con sistema DORI para IDS (Capitaine, 2012).

Los parámetros ICRF e ITRF conocidos como EOP (Parámetros de orientación de la Tierra), permiten determinar la posición momentánea del eje de rotación de la tierra, los cuales son: el tiempo universal coordinado (UTC), las coordenadas CEP (Polos de las Efemérides Celestes) y los factores de precesión y nutación IAU2006/2000 (Figurski Mariusz, 2017).

SIRGAS

SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) es la Subcomisión 1.3b de la IAG (International Association of Geodesy) y Grupo de Trabajo del IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), y es el encargado de la densificación y mantenimiento continental del ITRF (Cioce et al., 2017). Surge en 1993 como un proyecto de cooperación internacional entre países sudamericanos para establecer un marco de referencia la cual sea compatible con el novedoso GPS de la época. Por lo tanto, se trata entonces, de una comunidad técnica y científica que ha venido trabajando de manera coordinada para cumplir ciertos objetivos: proveer a la región de un marco de referencia geodésico (geométrico y físico) altamente confiable y consistente a nivel global; implementar y mantener la infraestructura de datos espaciales de la región basada en SIRGAS como capa fundamental, y finalmente medir y modelar efectos del cambio global en su área de influencia.

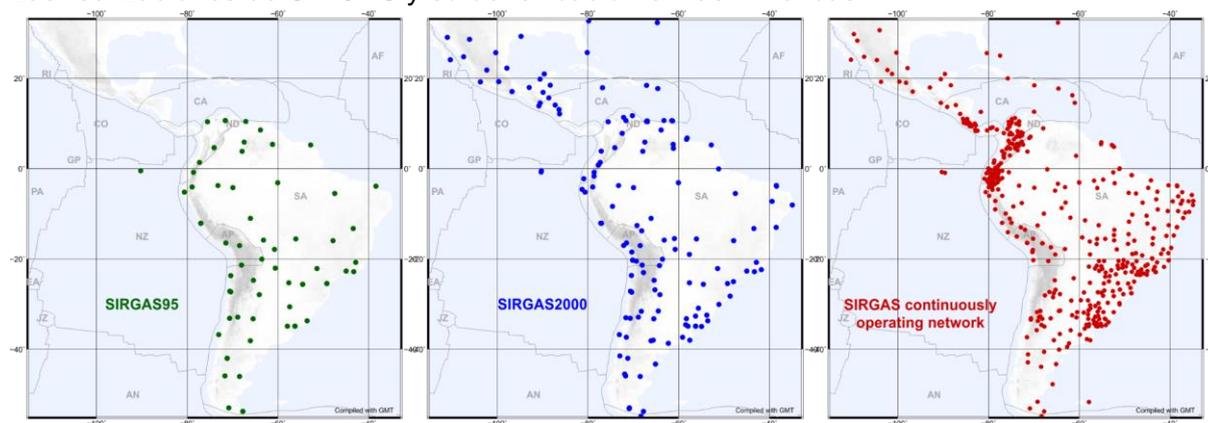
Desde su establecimiento hasta el día de hoy, SIRGAS cuenta con tres realizaciones: SIRGAS95, SIRGAS2000 y la Red SIRGAS de operación continua. SIRGAS95 fue el primer marco de referencia geocéntrico global, compatible con GPS, que tuvo América del Sur

(Brunini & Sánchez, 2013). Esta realización fue constituida por 58 sitios (monumentos geodésicos) ubicados en 11 países de Sudamérica con una precisión entre ± 6 mm. Como consecuencia de la densificación y expansión de la red geodésica hacia el continente americano en los años siguientes, la realización SIRGAS2000 fue calculada. Esta red constaba de 184 sitios distribuidos ya en todo el continente, algunos de los cuales ya eran estaciones GPS de operación continua con una precisión de alrededor ± 6 mm.

En la actualidad se cuenta con SIRGAS-CON (Red SIRGAS de Operación CONTinua) que cuenta con más de 400 estaciones. Se realiza un procesamiento semanalmente de la red para la determinación de coordenadas semanales y soluciones multianuales del marco de referencia. La precisión media alcanzada por las soluciones está en el orden de ± 1.2 mm en las componentes Norte y Este y de unos ± 2.5 mm en la altura. El cálculo semanal de la red es de carácter imprescindible para poder mantener un marco actualizado que en este caso está vinculado al ITRF vigente, es decir el ITRF2014.

Figura 1

Las realizaciones de SIRGAS y su densificación en las Américas



Nota: Recuperado de la página oficial de SIRGAS, <https://www.sirgas.org/es/sirgas-realizations/>

Es además importante destacar los sitios web de SIRGAS, <https://www.sirgas.org/> y <https://sirgas.ipgh.org/> los cuales han acompañado al proyecto durante su evolución y crecimiento principalmente el primero. Ambos portales son fuentes de información y

conocimiento, donde se puede encontrar las soluciones semanales y multianuales que SIRGAS procesa permanente y en tiempo real.

El Servicio Internacional GNSS (IGS)

El Servicio Internacional de GNSS (IGS), anteriormente Servicio Internacional de GPS, es una colaboración voluntaria de más de 200 organizaciones contribuyentes en más de 100 países dedicado a la generación de datos y productos GNSS de alta precisión (Kouba, 2009). Instituido en el año 1992 y lanzado oficialmente en el año 1994, el IGS ha entregado una serie cronológica de productos GNSS los cuales son utilizados por una amplia gama de usuarios. Los productos IGS han evolucionado con el tiempo, incluido el suministro de datos GNSS para constelaciones distintas del GPS, y la adición de datos y productos GNSS en tiempo real (Johnston et al., 2017).

Uno de los principales objetivos del IGS es brindar a sus usuarios de las ciencias e ingenierías relacionadas con GNSS, productos y observaciones tales como:

- Órbitas GNSS y relojes
- Parámetros de rotación terrestre
- Coordenadas de estaciones
- Parámetros ionosféricos y troposféricos
- Estimaciones sistemáticas de sesgo

Algunas de las aplicaciones que se dan gracias a estos productos de alta precisión son, la realización del ITRF, monitoreo de la deformación de la Tierra sólida producida por mareas oceánicas e hidrología, monitoreo del cambio del nivel medio del mar y algunos eventos asociados al cambio climático. Otras de las aplicaciones vistas que han ido en auge son la utilización de estos productos para sondear la atmósfera y producir mapas ionosféricos y troposféricos (Johnston et al., 2017). Por último, los productos IGS son altamente utilizados en proyectos de posicionamiento preciso que vienen a formar parte de la industria y sociedad.

A mediados del 2011, el IGS comenzó el Experimento Multi-GNSS (MGEX) (Montenbruck, 2017). El proyecto pretende demostrar la interoperabilidad entre varios GNSS principalmente GPS y GLONASS para promover su uso conjunto en varias aplicaciones como

el posicionamiento preciso de puntos y en la investigación atmosférica. Las observaciones de la red IGS se ponen a disposición de los usuarios a través de archivos de datos IGS y en tiempo real a través de flujos de datos. La mayoría de las estaciones IGS empleadas para el servicio rutinario GPS y GLONASS proporcionan sus datos en la versión 2 de RINEX, pero debido a MGEX, varias instituciones que contribuyen al proyecto han actualizado estos datos en su versión avanzada 3 de RINEX. Esto con el único objetivo de soportar nuevas constelaciones con diversas señales para un procesamiento de alta precisión de datos GNSS.

Al igual que SIRGAS, el IGS posee la página web <<https://igs.org/>>, el cual sirve como medio para la utilización y descarga de productos de alta calidad de datos GNSS en tiempo real. El portal es además un sitio de información actualizado y creciente acerca del servicio GNSS y los productos que desarrolla.

Sistema Global de Navegación por Satélite - GNSS

GNSS es el término genérico que hace referencia a todos los sistemas de navegación por satélite que proporcionan geoposicionamiento autónomo con una cobertura mundial. Actualmente, existen dos sistemas de navegación satelital (SNS) que predominan sobre los demás los cuales son totalmente operativos siendo NAVSTAR GPS (Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System) creado y mantenido por el Departamento de Defensas de los Estados Unidos y el Sistema Global de Navegación Satelital Ruso (GLONASS, Globaluaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). Además de estos, dos relativamente nuevos sistemas globales Beidou (China) y Galileo (Europa) se han consolidado. A diferencia de los mencionados, existen cuatro Sistemas de Aumentación basados en satélites (SBAS): EGNOS en Europa, GAGAN en la India, MSAS en Japón y WAAS en los Estados Unidos. Otros cuatro nuevos sistemas, SDCM (System for Differential Correction and Monitoring) en Rusia, KASS (Korean Augmentation Satellite System) en Corea, SNAS (Satellite Navigation Augmentation System) en China y SACCSA (Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica) en América del Sur, también están en construcción. Todos estos SBSA permiten o permitirán a los receptores GNSS compatibles calcular estimaciones con una precisión mejorada y advertencias de integridad asociadas

(Januszewski, 2017). Finalmente, los SNS regionales, el NAVIC indio (NAVigation Indian Constellation) y el QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) japonés, está actualmente en construcción. Cabe resaltar que todos los sistemas que se mencionaron incluyendo los Sistemas de Aumentación basados en Tierra (GBAS, Ground Based Augmentation Systems) son GNSS.

Todos los GNSS para su funcionamiento tienen tres segmentos: segmento espacial, segmento de control (segmento de tierra) y un segmento de usuario) (Bonnor, 2012). El segmento espacial consta específicamente de la constelación de satélites y la señal que emite, el segmento de control está formado por toda la infraestructura en tierra capaz de monitorear, controlar y procesar la información captada, y por último el segmento usuario es todo receptor GNSS que pueda captar o utilizar la información proveniente del segmento espacial.

El principio fundamental de la cual se basa un sistema de navegación por satélite es la creación de una trilateración desde cualquier punto de la superficie terrestre hasta los satélites a la vista (Lechner & Baumann, 2000). La distancia desde el punto hasta el satélite se mide con el tiempo que requiere la señal de radio para llegar al receptor. Debido a que una señal de radio viaja con la velocidad de la luz, se utilizan relojes de alta precisión. Estos son relojes atómicos, y los receptores avanzados utilizan relojes de cuarzo. La distancia al satélite se puede calcular multiplicando el tiempo de viaje por la velocidad de la luz (aproximadamente 300.000 km/s). Pero antes se necesita la ubicación exacta del satélite en el espacio para este procedimiento. Este requisito es posible ya que las órbitas son muy estables y predecibles. El segmento espacial es constantemente monitoreado por estaciones terrestres, que incluyen la información espacial en la señal. Estos datos son las efemérides (órbita de un satélite), datos de almanaque (relación entre todos los satélites) e información sobre los relojes de los satélites.

A partir de la década de los 90s, la cual fue una de las primeras etapas de la navegación por satélite, los receptores de GPS (el único SNS global en ese momento plenamente operativo) estaban disponibles para los usuarios civiles. Casi todos los receptores

GNSS transmitían solo en una frecuencia u un código, L1 y el código C/A respectivamente. En los años siguientes, el número de frecuencias GPS disponibles aumentaron, L2C - bloque satélite IIR M (desde 2005) y L5 - bloque IIF (desde 2012) y el código P se puso a disposición de todos los usuarios. En cuanto a GLONASS desde diciembre de 2011, está en pleno funcionamiento y se transmiten dos frecuencias a los usuarios civiles. A continuación, en la tabla 1 se describen las frecuencias y señales de las principales constelaciones de GNSS.

Tabla 1

Frecuencias y señales de las principales constelaciones GNSS

| Sistema | Frecuencia (MHz) | Señales | Bloques Satelitales | En órbita desde | Número de satélites en el 2017, año de constelación final (número de satélites) |
|----------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| Beidou | 1,561.098 | B1I, B1Q, B2I, B2Q, B3 | Todos | 2007 | 20, 2020 (35) |
| | 1,207.140 | | | | |
| | 1,268.520 | | | | |
| Galileo | 1,176.45 | 1 (E5a) | Todos | 2011 | 13, 2019 (26), 2021 (30) |
| | | 2 (E5a) | | | |
| | 1,207.14 | 3 (E5b) | | | |
| | | 4 (E5b) | | | |
| | 1,278.45 | 5 (E6) | | | |
| | | 6 (E6) | | | |
| | | 7 (E6) | | | |
| | 1,575.42 | 8 (L1) | | | |
| | | 9 (L1) | | | |
| | | 10 (L1) | | | |
| GLONASS | 1,602+n*0.5625 | L1OF L1SF | Todos | 2003 | 24, desde 2011 |
| | 1,246+N*0.4375 | L2OF L2SF | Todos | 2003 | 24, desde 2011 |
| | 1,202.025 | L3OC | K1, K2, KM | 2014, 2018, 2025 | 1, 0, 0, 2030 o luego (24) |
| | 1,575.42 | L1OCM | KM | 2025 | 0, 2030 o luego (24) |
| | 1,207.14 | L3OCM | KM | 2025 | 0, 2030 o luego (24) |
| | 1,176.45 | L5OCM | KM | 2025 | 0, 2030 o luego (24) |

| | | | | | |
|-------------------|-------------|--------------------|---|------------------------------|---|
| GPS | L1 1,575.42 | C/A P M C | Todos Todos Desde IIR- M III | 1997 1997 2005 2018 | 31, desde 1997 31, desde 1997 19, 2020 o luego (24) 0, 2020s (24) |
| | L2 1,227.60 | P C M | Todos Desde IIR- M Desde IIR-M | 1997 2005 2005 | 31, desde 1997 19, 2020 o luego (24) 19, 2020 o luego (24) |
| | L5 1,176.45 | C | Desde IIF | 2011 | 12, 2022 o luego (24) |
| n=-7, -6, ..., +6 | | | | | |

Nota: Recuperado de (Januszewski, 2017)

Global Positioning System (GPS)

El Navstar GPS es un sistema satelital multipropósito que fue desarrollado por el Departamento de Defensa y el Departamento de Transporte de los Estados Unidos a comienzos de la década de 1970. Fue diseñado originalmente como una fuerza militar por parte de los Estados Unidos para la navegación y posicionamiento preciso. Su uso principal es proveer coordenadas espaciales en tiempo real sin importar el clima para la navegación. Estas coordenadas tienen una precisión típica de más o menos 10 metros, pero con mejoras o aumentación pueden reducirse al milímetro (Monmonier, 2015).

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos aprobó la construcción del sistema universal Navstar GPS en 1973 para reemplazar la primera generación del sistema de navegación por satélite conocido como Transit (Monmonier, 2015). Transit había sido diseñado por la marina estadounidense para la navegación marítima, pero los resultados no fueron los esperados por lo que llevó al desarrollo de GPS. Dicho sistema fue capaz de introducir la navegación tridimensional. El posicionamiento preciso es posible utilizando receptores GPS en ubicaciones de referencia que proporcionan datos de corrección para receptores remotos. Algunas aplicaciones son la topografía, el control geodésico y los estudios tectónicos de placas. La difusión de tiempo y frecuencia, basada en los relojes precisos a bordo de los vehículos espaciales y controlados por las estaciones de monitoreo,

es otro uso para el GPS. Los observatorios astronómicos, las instalaciones de telecomunicaciones y los estándares de laboratorio pueden ajustarse a señales horarias o a frecuencias precisas y de control por receptores GPS de propósito especial. Los proyectos de investigación han utilizado señales GPS para medir parámetros atmosféricos como los coeficientes de vapor de agua.

RINEX

El formato Receiver INdependent EXchange (RINEX) fue desarrollado para facilitar el intercambio de datos del (GPS), el cual fue galardonada en el 5° simposio geodésico (Gurtner,2007), RINEX descifra los datos binarios de cada receptor para transformarlos en un formato independiente universal, permitiendo que varios softwares interactúen con los observables, la base fundamental del RINEX que es recogida de los receptores es (Medina Francisco, 2010):

- La medida de la portadora de fase en una o dos frecuencias (L1 o L1 y L2).
- La medida de Pseudodistancia o código.
- El tiempo obtenido en el instante de validar las medidas de fase y código.

Ya que con estos observables y alguna información adicional (altura de la antena, nombre y código de la estación, entre otros) es suficiente.

Existen al día de hoy tres versiones de formato de RINEX que han sido desarrolladas y publicadas. La versión originaria de RINEX 1 fue creada y presentada en 1989. Por siguiente la versión 2 de RINEX fue presentada y aceptada en el segundo simposio internacional de posicionamiento preciso, donde incorporaron la posibilidad de incluir datos de diferentes satélites (GLONASS, SBAS). Varias subversiones de la versión 2 fueron definidas que incluían algunos cambios al transcurso de los años. Pero principalmente a partir de la versión 2 el formato RINEX se compone por cuatro archivos: meteorológicos, mensaje de navegación, mensaje de navegación GLONASS y los de observación (International GNSS Service, 2013).

- Los archivos Meteorológicos: Contiene datos como la presión atmosférica en milibares, la temperatura seca y húmeda en grados Celsius, humedad relativa y opcionalmente la humedad central del retardo ionosférico (Medina Francisco, 2010).

- Los archivos de Navegación: Contienen los datos de los orbitales, los parámetros del reloj y la precisión de las medidas de pseudodistancia de los satélites observados, los archivos de navegación GLONASS contienen los mismos datos (Medina Francisco, 2010).
- Los archivos de Observación: Contienen datos de la pseudodistancia se mide en metros y se aceptan de tres tipos la C1 (código C/A o estándar sobre la frecuencia L1), la P1 (código P o Precise en L1) y la P2 (código P en L2). La medición de fase también se puede realizar sobre las frecuencias L1 o L2, y se denominan del mismo modo, se miden en ciclos completos. La mayoría de los receptores miden el tiempo en la llegada de la señal tanto para la pseudodistancia como para la medición de fase (Gurtner,2018).

La versión más reciente de RINEX es su versión 3, en el cual el cambio más significativo visto es el requisito de generar observaciones de fase consistentes a través de diferentes modos o canales de seguimiento, es decir, aplicar turnos de 1/4 de ciclo antes de la generación de archivos RINEX, si es necesario, para facilitar el procesamiento de dichos datos. Además, en sus subversiones ha añadido soporte para otros sistemas de navegación satelital como el QZSS y el Sistema de Navegación Satelital Regional Indio (IRNSS).

Estructura de los archivos de Observación

Cada uno de los tipos de archivos de RINEX consta de dos partes, una cabecera y una sección de datos. La sección de la cabecera contiene información global del archivo y es presentada al inicio del mismo (RINEX 3.04.IGS.RTCM, 2018). Son de carácter obligatorio y se muestra un ejemplo del archivo de observación a continuación:

Figura 2

Ejemplo de una cabecera de un archivo de observación RINEX

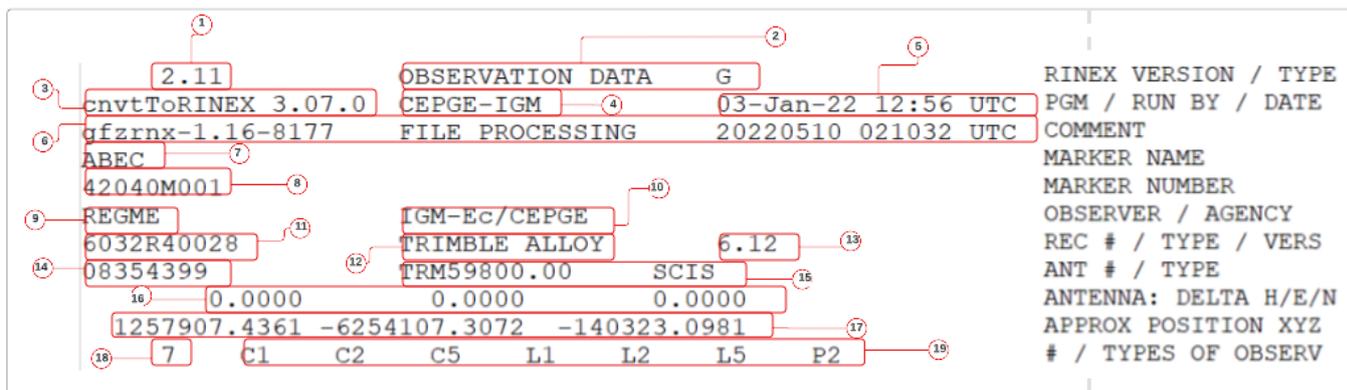


Tabla 2

Partes de la cabecera de un archivo de observación RINEX

| | | | | | |
|---|---|----|-----------------------|----|---|
| 1 | Versión del formato (2.11) | 8 | Número de la estación | 15 | Tipo de antena |
| 2 | Tipo de archivo (Observación), Sistema Satelital (G-GPS) | 9 | Nombre del observador | 16 | Altura de la antena, excentricidades del centro de la antena en relación con el marcador al este y norte (metros) |
| 3 | Nombre del programa que crea el archivo | 10 | Nombre de la agencia | 17 | Posición aproximada de la estación (WGS84) |
| 4 | Nombre de la agencia que crea el archivo | 11 | Número del receptor | 18 | Número de diferentes tipos de observaciones |
| 5 | Fecha de la creación del archivo | 12 | Tipo de receptor | 19 | Tipos de observaciones (C: pseudorange, L: fase portadora) |
| 6 | Nombre del programa, agencia y fecha que modifíco el archivo actual | 13 | Versión del receptor | | |
| 7 | Nombre de la estación | 14 | Número de la antena | | |

| | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|
| 3 | Número de segundos bisiestos desde el 6 de enero de 1980 (recomendados para archivos mixtos) | 6 | Número de observaciones para cada tipo de observación indicada | 9 | Hora del último registro de observación (año 4 dígitos, mes, día, hora, minuto, segundo y tipo de sistema) |
|---|--|---|--|---|--|

| | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|
| 1 | Factores de longitud de onda predeterminados para L1 y L2 (solo GPS), 1: Ambigüedades de ciclo completo, 2: Ambigüedades de semiciclo, 0: instrumento de frecuencia única (L2) | 4 | Total de número de satélites | 7 | Intervalo de las observaciones en segundos |
| 2 | La época, el código y la fase se corrigen aplicando el desplazamiento del reloj del receptor derivado del tiempo real: 1=sí, 0=no; predeterminado: 0=no se requiere registro si las compensaciones de reloj se informan en los registros EPOCH/SAT | 5 | Número del satélite | 8 | Hora del primer registro de observación (año 4 dígitos, mes, día, hora, minuto, segundo y tipo de sistema) |
| 3 | Número de segundos bisiestos desde el 6 de enero de 1980 (Recomendado para archivos mixtos) | 6 | Número de observaciones para cada tipo de observación indicado | 9 | Hora del último registro de observación (año 4 dígitos, mes, día, hora, minuto, segundo y tipo de sistema) |

Figura 4

Ejemplo de una cabecera de un archivo de observación RINEX (continuación)

```

22 02 20 00 00 00.0000000 0 12602G03G06G07G09G11G13G14G17G19G20G30
22672902.695 6 22672909.84048 119147016.601 6 92841928.92248
25048533.734 2 25048545.863 8 25048545.832 8 131630879.405 2 102569597.268 8
98295870.587 8 25048545.61347
21426386.227 7 21426396.625 9 21426394.898 9 112596625.349 7 87737744.694 9
84082048.582 9 21426396.11748
23341590.398 5 23341601.367 8 122660906.243 5 95580028.903 8
23341601.53947
24320052.016 5 24320064.813 9 24320064.563 9 127802830.559 5 99586700.912 9
95437275.842 9 24320065.15648
22084855.848 7 22084866.613 9 22084868.844 9 116056856.760 7 90433997.210 9
86666041.304 9 22084866.57448
25082862.828 1 131811245.494 1 102710182.58845
25082876.91445
20662731.191 7 20662741.113 9 20662743.375 9 108583741.594 7 84610768.087 9
81085272.537 9 20662740.98449
23895733.641 5 23895742.211 8 125573084.507 5 97849267.534 8
23895741.81647
    
```

Tabla 4

Partes de la sección de datos de un archivo de observación RINEX

| | | | | | |
|-------|--|----|---|--|---|
| 1 | de | 4 | Especificación de los satélites observados (G: GPS, R: GLONASS, E: GALILEO) | 7 | Intensidad de la señal (intervalos de 1-9); 1: intensidad de señal mínima posible, 5: umbral para una buena relación señal/ruido, 9: máxima intensidad de señal posible, 0 o en blanco: desconocido, no importa |
| <hr/> | | | | | |
| 2 | Indicador | de | 5 | La observación (ordenado con el tipo de observación y el satélite) | |
| | | | Falla de energía entre la época anterior y actual, >1: Bandera de evento | | |
| <hr/> | | | | | |
| 3 | Número total de satélites observados en la época | de | 6 | Indicador de pérdida de bloques (LLI): 0 o en blanco = OK, bit 4 = Observación bajo Antispoofing (puede sufrir un aumento de ruido, bit 5 = bloqueo perdido entre la observación anterior y la actual (posible deslizamiento de ciclo), bit 2 = Factor de longitud de onda opuesto al definido para el satélite por una línea anterior | |

WAVELENGTH FACT L1/2 u

opuesto al predeterminado

SINEX

El formato SINEX (Software INdependent EXchange) fue desarrollado por geodestas del IGS, para tener un único formato de salida de soluciones para todas las técnicas y fue operativa debido al uso por parte del ILRS y del IVS, por el intercambio de información de las soluciones entre las organizaciones en el 2001, una gran ventaja es que los sistemas de ecuaciones reconstruidos pueden combinarse con otros sistemas de ecuaciones normales para crear una nueva solución.

El archivo SINEX se subdivide en grupos de datos llamados bloques, cada bloque está encerrado por una línea de encabezado y una línea final (+, - para comenzar y finalizar el bloque respectivamente), cada bloque tiene un formato fijo, los bloques contienen información sobre el archivo, su entrada, los sitios y la solución.

Un archivo SINEX debe comenzar con una línea de encabezado y terminar con una línea de pie de página, se definen los siguientes bloques:

Figura 5

Bloques de un archivo SINEX

```

FILE/REFERENCE
FILE/COMMENT
INPUT/HISTORY
INPUT/FILES
INPUT/ACKNOWLEDGEMENTS
NUTATION/DATA
PRECESSION/DATA
SOURCE/ID
SITE/ID
SITE/DATA
SITE/RECEIVER
SITE/ANTENNA
SITE/GPS_PHASE_CENTER
SITE/ECCENTRICITY
BIAS/EPOCHS
SOLUTION/EPOCHS
SOLUTION/STATISTICS
SOLUTION/ESTIMATE
SOLUTION/APRIORI
SOLUTION/MATRIX_ESTIMATE {p} {type}
SOLUTION/MATRIX_APRIORI {p} {type}
SOLUTION/NORMAL_EQUATION_VECTOR
SOLUTION/NORMAL_EQUATION_MATRIX {p}

```

2Donde [p] puede ser la parte superior o inferior de la matriz, L para inferior o U para superior, se almacena en forma triangular porque la matriz siempre es simétrica. Para el [type] es el contenido de la matriz, que puede ser: CORR - Matriz de correlación, COVA- Matriz de covarianza e INFO- Matriz de información (de normales), es decir $COVA^{-1}$.

Efemérides GPS

Las efemérides de satélite describen la órbita de un satélite, es un conjunto de parámetros orbitales y sus correcciones correspondientes a un momento determinado (Ma Lihua et al., 2019). Gracias a las efemérides, se puede calcular la posición y la velocidad de un satélite específico en cualquier momento. Dentro del posicionamiento GPS existen dos tipos de efemérides, las efemérides transmitidas y las efemérides de post-procesamiento. O también llamadas efemérides de pronóstico y efemérides precisas, respectivamente. La diferencia principal entre estos dos tipos de información orbital es que las efemérides transmitidas son receptadas desde el satélite de navegación en tiempo real mientras que las efemérides de precisión, como su nombre lo indica, tiene una precisión relativamente alta ya que es post-procesamiento.

Cabe mencionar que las efemérides transmitidas o de difusión son enviadas a los usuarios como mensajes de navegación, el cual contiene los parámetros keplerianos, parámetros de tiempo y parámetros de perturbación necesarios para calcular las coordenadas y las correcciones de reloj para cada satélite. Mientras que las efemérides precisas dependen de las observaciones de satélites GPS en las estaciones de monitoreo repartidas por todo el mundo. Estas observaciones son de algunas estaciones de la IGS y proveen información orbital que luego es post-procesado. A diferencia de las efemérides transmitidas, estas efemérides no se transmiten al receptor a través del mensaje de navegación GPS, sino que utiliza la comunicación inalámbrica terrestre, por satélite y otros medios para servir a los usuarios requeridos. Los archivos de datos de efemérides precisas se pueden obtener en el sitio web de IGS en el directorio: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>.

El IGS comenzó a publicar los archivos de efemérides precisos en forma de producto estándar #3 versión C también conocido como SP3C en los que las órbitas y relojes del satélite GPS y sus incertidumbres estaban disponibles desde 2004. La incorporación de estas incertidumbres en las ecuaciones de observación GPS resulta en un mejor modelo estocástico del sistema de procesamiento (Shirazian, 2022). Hoy en día se encuentran solamente en formato SP3, el cual contiene las efemérides tabulares de posiciones satelitales en un intervalo de 15 minutos.

Desde su fundación en el año 1994, el IGS ha proporcionado efemérides de órbita precisas de diferentes series del producto. Las órbitas del GPS ultrarrápido abarcan 48 horas y se liberan cuatro veces al día con una latencia inicial de 3 horas. Las efemérides ultrarrápidas se dividen en dos secciones, cuya primera mitad se basa en ajustes a los datos de observación, mientras que la segunda mitad es una predicción (Griffiths & Ray, 2009). Dichas efemérides están destinadas a aplicaciones en tiempo real dada su increíble rapidez de publicación. Por otro lado, las efemérides rápidas GPS cubren las 24 horas del día UTC anterior con una latencia inicial de 17 horas. Están diseñadas para usos rápidos y de alta precisión. Finalmente, las órbitas finales GPS y GLONASS son los productos orbitales IGS definitivos y se publican semanalmente como un paquete de siete archivos diarios. Se toma

especial cuidado para asegurar el más alto nivel de coherencia con los marcos de referencia terrestres IGS asociados, los parámetros de rotación de la Tierra y los relojes de receptores y satélites. En consecuencia, la latencia de los productos finales es más larga, aproximadamente 13 días o más. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los productos de efemérides precisos:

Tabla 5

Precisión, latencia, intervalo de muestra y actualización de los productos de efemérides precisos

| Tipo | Precisión | Latencia | Intervalo de Muestra | Actualización |
|------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Transmitidas | ~100 cm | Tiempo real | Diario | – |
| Ultrarrápidas (mitad previsto) | ~5 cm | Tiempo real | 15 min | A las 03, 09, 15, 21 horas UTC |
| Ultrarrápidas (mitad observada) | ~3 cm | 3-9 horas | 15 min | A las 03, 09, 15, 21 horas UTC |
| Rápidas | ~2.5 cm | 17-41 horas | 15 min | A las 17 horas UTC diariamente |
| Finales | ~2.5 cm | 12-18 días | 15 min | Cada jueves |

Nota: Recuperado de (Tusat & Ozyuksel, 2018)

Con todas las series de las órbitas ya mencionadas, el IGS proporciona estimaciones de la calidad del producto en forma de "códigos de precisión" para cada satélite sobre la base de la media cuadrática ponderada de la raíz (WRMS) de las diferencias entre las observaciones de los centros de análisis de la IGS contribuyentes en comparación con las

órbitas medias (Griffiths & Ray, 2009). Esta información se encuentra en la octava y novena fila de la cabecera del archivo SP3, como un sistema de logaritmo de base 2. El resultado se expresa entonces en milímetros.

$$\text{Código de Precisión} = \log_2(\sigma) \quad (1)$$

Figura 6

Códigos de precisión de las efemérides (archivos SP3)

```
#cP2022 1 1 0 0 0.00000000 96 ORBIT Igb14 HLM IGS
## 2190 518400.00000000 900.00000000 59580 0.00000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
++ 2 2 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.000000000000 0.0000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfz grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS14 2188 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
```

Productos de reloj (CLK)

Las correcciones de reloj satelital en tiempo real generalmente se estiman utilizando observaciones de fase y rango no diferenciadas de una red global (Ge et al., 2012). Debido a que se debe estimar un gran número de parámetros de ambigüedad, el cálculo requiere mucho tiempo. En consecuencia, la mayoría de los Centros de Análisis en Tiempo Real de IGS procesa solo una red global escasa de número limitado de estaciones con una tasa de actualización de 5 s.

El centro de análisis (IGS) proporciona las soluciones de reloj, estos resultados son de productos combinados y pueden ser de dos formas, tabular a cinco minutos o treinta segundos, se archivan en el CDDIS (Sistema de Información de Datos de la Dinámica

Crustal), además el IGS solo dispone de soluciones combinadas de reloj rápidas y finales, la solución rápida de reloj está disponible aproximadamente diecisiete horas después del día UTC anterior, asimismo las soluciones finales de reloj están disponibles aproximadamente trece días después de la semana de solución. Las correcciones de reloj presentan una latencia, intervalo de muestra y actualización igual a las efemérides precisas ya que son procesadas en conjunto. En la siguiente tabla se detallan las características de las soluciones de reloj (CLK).

La parte prevista de la órbita proporcionada por las efemérides ultrarrápidas de la IGS tiene una precisión al centímetro, que es conveniente para aplicaciones en tiempo real. Sin embargo, la solución ultrarrápida de reloj se desvía rápidamente debido a la variación de frecuencia originada de una variedad de efectos, por ejemplo, temperatura ambiente, voltajes de suministro, campo magnético, entre otros (Shi et al., 2018). Por lo tanto, la estimación en tiempo real de los relojes de satélite es uno de los objetivos clave del servicio GNSS de alta precisión y que no está disponible aún dentro de la IGS.

Tabla 6

Precisión, latencia, intervalo de muestra y actualización de los productos de reloj precisos

| Tipo | Precisión | Latencia | Intervalo de Muestra | Actualización |
|------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Transmitidas | ~5 ns RMS | Tiempo real | Diario | - |
| Ultrarrápidas (mitad previsto) | ~3 ns RMS | Tiempo real | 15 min | A las 03, 09, 15, 21 horas UTC |
| Ultrarrápidas (mitad observada) | ~150 ps RMS | 3-9 horas | 15 min | A las 03, 09, 15, 21 horas UTC |
| Rápidas | ~75 ps RMS | 17-41 horas | 5 min | A las 17 horas |

| UTC | | | | |
|-------------|------------|------------|---------------------------|-------------|
| diariamente | | | | |
| Finales | ~75 ps RMS | 12-18 días | 5 min (Est) 30 s (Sat) | Cada jueves |

Nota: Recuperado de (Tusat & Ozyuksel, 2018), Reloj de estación (Est) y Reloj de satélite (Sat).

La estructura de un archivo CLK se asemeja a la estructura de un archivo de observación, ya que cuenta con un encabezado donde se encuentran semejanza en los apartados, agregando apartados relacionados con datos de los relojes como se ve en la figura 7.

Figura 7

Ejemplo de la cabecera de un archivo de reloj

```

3.00          CLOCK DATA          GPS          RINEX VERSION / TYPE
TORINEXC V9.9  USNO                19960403 001000 UTC  PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A CLOCK DATA ANALYSIS FILE  COMMENT
IN THIS CASE ANALYSIS RESULTS FROM GPS ONLY ARE INCLUDED  COMMENT
No re-alignment of the clocks has been applied.  COMMENT
① ⑥ 4 C1W L1W C2W L2W  SYS / # / OBS TYPES
GPS  TIME SYSTEM ID
10  LEAP SECONDS
② G CC2NONCC  pic1bias.hist @ goby.nrl.navy.mil  SYS / DCBS APPLIED
G PAGES  igs05.atx @ igs.cb.jpl.nasa.gov  SYS / PCVS APPLIED
② AS AR ③ # / TYPES OF DATA
USN USNO USING GIPSY/OASIS-II  ANALYSIS CENTER
1 1994 07 14 0 0 0.000000 1994 07 14 20 59 0.000000# OF CLK REF
USNO 40451S003  -.123456789012E+00 ANALYSIS CLK REF
1 1994 07 14 21 0 0.000000 1994 07 14 21 59 0.000000# OF CLK REF
④ TIDB 50103M108 ⑤ ⑧ -.123456789012E+00 ANALYSIS CLK REF
④ ④ ITRF96 # OF SOLN STA / TRF
GOLD 40405S031 1234567890 -1234567890 -1234567890SOLN STA NAME / NUM
AREQ 42202M005 -1234567890 1234567890 -1234567890SOLN STA NAME / NUM
⑥ TIDB 50103M108 ⑦ ⑦ 1234567890 -1234567890 1234567890SOLN STA NAME / NUM
HARK 30302M007 -1234567890 1234567890 -1234567890SOLN STA NAME / NUM
USNO 40451S003 1234567890 -1234567890 -1234567890SOLN STA NAME / NUM
27 # OF SOLN SATS
G01 G02 G03 G04 G05 G06 G07 G08 G09 G10 G13 G14 G15 G16 G17 PRN LIST
G18 G19 G21 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G29 G30 G31 PRN LIST
END OF HEADER
AR AREQ 1994 07 14 20 59 0.000000 6 -.123456789012E+00 -.123456789012E+01
-.123456789012E+02 -.123456789012E+03 -.123456789012E+04 -.123456789012E+05
AS G16 1994 07 14 20 59 0.000000 2 -.123456789012E+00 -.123456789012E-01
AR GOLD 1994 07 14 20 59 0.000000 4 -.123456789012E-01 -.123456789012E-02
-.123456789012E-03 -.123456789012E-04
AR HARK 1994 07 14 20 59 0.000000 2 .123456789012E+00 .123456789012E+00
AR TIDB 1994 07 14 20 59 0.000000 6 .123456789012E+00 .123456789012E+00
.123456789012E+00 .123456789012E+00 .123456789012E+00 .123456789012E+00

```

Tabla 7*Partes de la cabecera de un archivo de reloj*

| | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|
| 1 | Código de sistema de satélite (G: GPS, GLONASS, GALILEO, SBAS) | 4 | Número de receptores incluidos en los registros de datos de reloj | 7 | Identificador único del receptor preferiblemente el número DOMES para estaciones fijas |
| 2 | Número de diferentes tipos de datos de reloj almacenados en el archivo | 5 | Marco de referencia terrestre o soluciones SINEX para las coordenadas estaciones/receptores que coinciden con la solución del reloj | 8 | Coordenadas de estación X, Y, Z geocéntricas correspondientes a los valores de reloj (mm) |
| 3 | Lista de tipos de datos de reloj | 6 | Designador de estación/receptor de caracteres | 4 | |

Funciones de Mapeo Troposféricas (GMF, VMF)

En las últimas décadas se han creado varios modelos para obtener una estimación del retardo troposférico que las señales GNSS sufren cuando recorre la atmosfera neutral, en función del ángulo de elevación del satélite, Helen Hopfield (1969) muestra la posibilidad de separar la reflectividad en una componente seca y una componente húmeda, los parámetros normalmente están relacionados con la temperatura, presión atmosférica, y humedad relativa, con el paso del tiempo se han añadido otros compontes como la latitud y la altitud de la posición del receptor GNSS (Priego De Los Santos, 2012).

Marini y Murray en 1973 desarrollan un modelo del retardo troposférico incorporando información meteorológica y la posición de la estación GNSS, y luego fue adoptada por Niel, Böhm, Tregoning, Herring, Werl y Schuh, extendieron la forma de fracción a tres términos o coeficientes y se escribe de la siguiente manera:

$$m_i(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_i}{\sin \varepsilon + \frac{b_i}{\sin \varepsilon + c_i}}} \quad (i = h, w) \quad (2)$$

Donde a_i , b_i y c_i son los coeficientes que dependen de los perfiles atmosféricos, designado por los índices "h" que es hidrostático o "w" húmedo, " ε " es el ángulo de elevación del satélite, las implementaciones GMF y VMF1, siguen esta forma adoptando diferentes valores para los coeficientes (Qiu,2020).

El VMF1 (Vienna Mapping Function) es una nueva versión del VMF, calculado con unos nuevos coeficientes "bh" y "ch" para el índice hidrostático, se determinaron con el método ray-tracing, es una técnica para reconstruir la trayectoria del rayo con un campo de refractividad tridimensional basado en la teoría de la óptica geométrica, con datos del modelo numérico global ERA-40 (ECMWF Re-Analysis 40 years) (Boehm, 2006).

La GMF (Global Mapping Function) toma las expresiones empíricas para los coeficientes "b" y "c" de la VMF1, mientras que para el coeficiente "a" se calcula con armónicos esféricos de una red global de $15^\circ \times 15^\circ$ con datos mensuales de presión, temperatura y humedad del modelo numérico del tiempo ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast), GMF tiene pocos errores anuales y pequeños sesgos regionales de altura (Qiu,2020).

Para lograr una mayor precisión en los análisis GPS, se recomienda utilizar funciones de mapeo troposféricos que se basan en datos meteorológicos, que hoy en día están

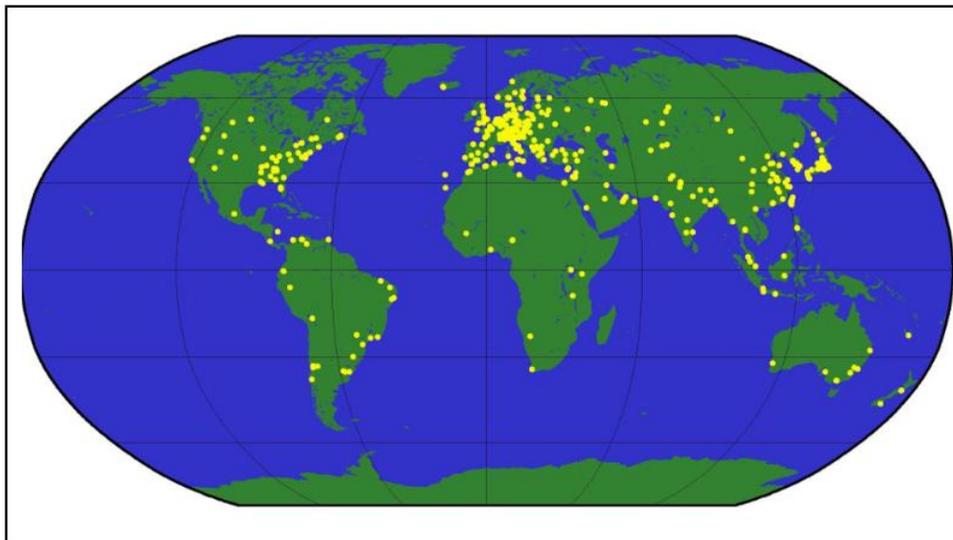
disponibles como series temporales de coeficiente con una resolución de seis horas como es el caso de VMF1, sin embargo, para periodos de tiempo particulares o estaciones donde las funciones de mapeo no están disponibles el GMF se puede servir como una función de mapeo de respaldo (Boehm, 2006).

Software Bernese 5.2

Bernese GNSS es un software de procesamiento de datos científico, de alta precisión y multi-GNSS (GPS – GLONASS), fue desarrollado en el Instituto Astronómica de la Universidad de Berna (AIUB), actualmente más de 700 instituciones (incluyendo Universidades) de todo el mundo están registradas en la base de datos de usuarios del software GNSS de Berna, estas ubicaciones se indican en la figura 8 (Dach et al., 2015).

Figura 8

Instituciones alrededor del mundo afiliados al software GNSS Bernese



Nota: Recuperado de (Dach et al., 2015).

El software GNSS desde marzo 1988 sufre un desarrollo rápido debido al crecimiento de las aplicaciones de alta precisión GPS con su nueva versión 3.0 y el lanzamiento de 5 subversiones (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5). A partir de septiembre de 1996, el Instituto Astronómica de la Universidad de Berna lanza la versión 4.0 con una primera versión del programa ADDNEQ para combinar ecuaciones normales para computar eficientemente soluciones multisesión y multicompañía. En la siguiente versión 4.2 que fue presentada en 1999 está

disponible la capacidad de procesar observaciones GLONASS (junto con observaciones GPS), así como mediciones SLR a satélites GNSS. Otro gran paso se da con el lanzamiento de la versión 5.0 en abril de 2004. Por primera vez, el Bernese GNSS Software cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI) basada en la biblioteca Qt, un sistema de ayuda basado en HTML incorporado, y un nuevo programa de automatización (Bernese Processing Engine, BPE), y Perl como el lenguaje de escritura BPE (Dach et al., 2015).

El programa actual versión 5.2 en su menú cuenta con una interfaz de más de 100 programas como: transferencia (RINEX), conversión, órbita (órbitas de satélites y parámetro de orientación de la Tierra), procesamiento, simulación y servicio (herramientas para manejar archivos, editar, navegar, manipular, verificar, comparar) (Dach et al., 2015).

El software GNSS Bernese 5.2 es especialmente adecuado para:

- Procesamiento eficiente de redes locales a globales utilizando una sola o doble frecuencia GNSS.
- Procesamiento automático de redes permanentes.
- Cualquier tipo de procesamiento posterior, desde el tiempo casi real hasta el reprocesamiento de años de datos de GNSS.
- Procesamiento de datos de un gran número de receptores.
- Procesamiento combinado de observaciones GPS y GLONASS.
- Análisis de receptores cinemáticos reales (incluso en aviones).
- Vigilancia de la ionosfera y la troposfera.
- Estimación de reloj y transferencia de tiempo.
- Determinación de la órbita para los satélites GNSS y LEO (Low Earth Orbit), junto con los parámetros conexos (por ejemplo, parámetros de orientación de la Tierra).
- Validación de órbita SLR.

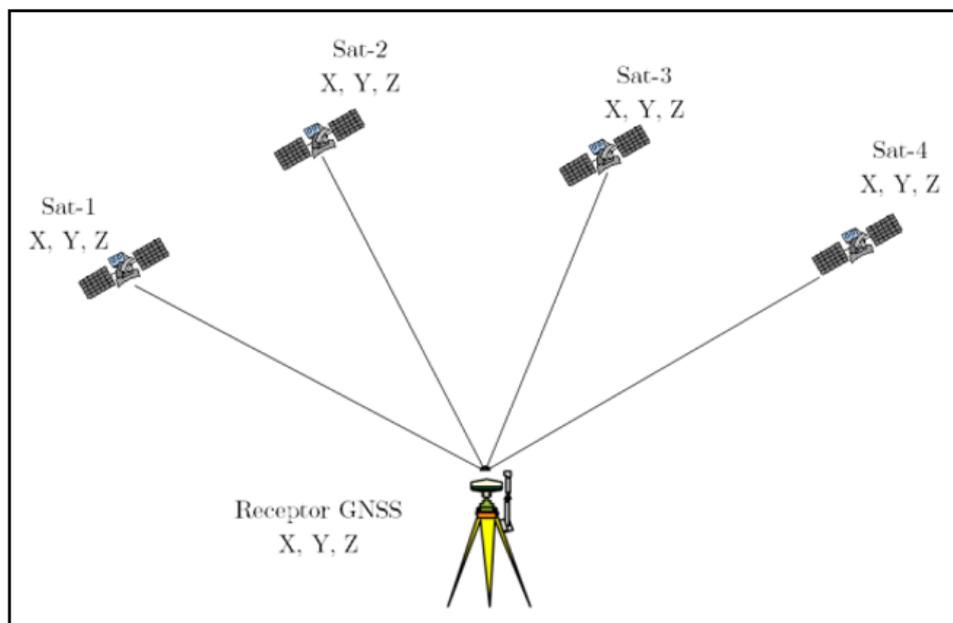
Posicionamiento Preciso de Punto (PPP)

Las observaciones GPS deben procesarse para obtener coordenadas de alta precisión, desplazamientos de alta precisión y, finalmente, para obtener estimaciones fiables y precisas de las velocidades del sitio. La precisión de las mediciones del GPS no depende

únicamente del equipo GPS (antena y receptor), sino que depende en gran medida de cómo se recojan los datos sobre el terreno y cómo se procesan los datos en el laboratorio. Por lo general, existen dos enfoques de procesamiento posterior de datos GPS utilizados para lograr mediciones de posicionamiento de alta precisión, los cuales son el posicionamiento relativo y el posicionamiento absoluto (Kearns et al., 2018). El enfoque del primero utiliza observaciones simultáneas de dos o más unidades GPS (estaciones fijas o estaciones de referencia). Por otro lado, el enfoque alternativo, el posicionamiento absoluto, determina la posición de una sola estación GPS sin utilizar observaciones simultáneas de otras estaciones GPS terrestres. El posicionamiento preciso de puntos (PPP) es un método de posicionamiento absoluto típico.

Figura 9

Descripción gráfica del posicionamiento absoluto típico



Nota: Recuperado de (Oruña, 2019)

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.

El Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP) se define como una 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. Esta tecnología de posicionamiento por satélite hace uso de las órbitas precisas y productos de reloj por satélite proporcionados por el IGS para lograr un posicionamiento de alta precisión al orden del decímetro-milímetro para un solo receptor (Xiong & Han, 2019).

El modelo matemático del PPP simplificado se denota de la siguiente manera:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + d_{trop} + e_r^s \quad (3)$$

$$\Phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + d_{trop} + \lambda N^s + e_r^s \quad (4)$$

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} \quad (5)$$

Dónde:

- s es el número de satélite
- r es el número de receptor
- ρ es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor en un momento t
- c es la velocidad de la luz
- P es la medida de pseudodistancia de código entre el receptor y el satélite en un momento t
- Φ es el número de ciclos entre el satélite y el receptor en un momento t
- dt_r es el error del reloj del receptor
- dt^s es el error del reloj del satélite
- d_{trop} es el retardo troposférico
- λ es la longitud de onda
- N representa las ambigüedades

- e representa la suma de otros errores

Debida a su simplicidad, el método PPP se ha aplicado en varias aplicaciones como, por ejemplo, la determinación precisa de la órbita de los satélites LEO, meteorología GPS, posicionamiento de alta precisión, reconocimiento aéreo, monitoreo de la deformación del suelo, comparación y monitoreo de relojes de satélite en tiempo real, etc. Dado que el PPP funciona bajo el concepto de posicionamiento absoluto, su ventaja principal es que utiliza un solo receptor para realizar el posicionamiento estático y cinemático en todo el mundo, y obtiene las coordenadas precisas en el ITRF vigente de manera directa.

Programas utilizados en el preprocesamiento de los productos GNSS

GFZRNX German Research Centre for Geosciences.

Es una herramienta diseñada para la comunidad GNSS, es compatible con archivos de observación, navegación y meteorológicos (RINEX), para versiones 2 y 3, las principales tareas son la comprobación, reparación y manipulación (muestreo, selección de sistemas satelitales y tipos de observación) de archivos RINEX, operaciones de empalme división, generación de estadísticas, extracción de metadatos.

Notepad ++.

Es un editor gratuito de código con soporte para varios lenguajes de programación, está escrito en C++ y utiliza API y STL de Win32, lo que garantiza una mayor velocidad de ejecución y un tamaño de programa más pequeño.

RNXCMP (Hatanaka-formato de compresión).

RNXCMP es el software para la compresión/restauración de archivos de observación RINEX desarrollado por (Hatanaka, 2008). Convierte el formato de los archivos de observación GNSS del formato RINEX (versión 2.xx o 3.xx) a un formato comprimido (el formato Compacto RINEX, o también llamado el formato comprimido Hatanaka) y viceversa.

Esto se logra mediante las herramientas rnx2crx y crx2rnx, que permiten al usuario comprimir/descomprimir, respectivamente, un archivo de observación RINEX en un formato ASCII más pequeño. Este formato se utiliza con frecuencia para intercambiar datos de observación de los GNSS a través de Internet y para resolver un inconveniente del formato

RINEX, ya que el tamaño del archivo de observación se vuelve grande en comparación con los formatos binarios específicos del receptor, incluso si se aplican esquemas de compresión de archivos ordinarios.

Capítulo III: Metodología

Procesamiento de datos GNSS

Con los objetivos establecidos al comienzo de esta investigación, la metodología se divide en tres etapas principales: la primera la descarga y tratamiento de datos GNSS, en segundo al procesamiento de datos y materialización de coordenadas, y como último el análisis de las soluciones. La etapa de descarga y tratamiento se analizaron los siguientes archivos:

- Archivos de observación de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME
- Archivos de órbita GNSS (Efemérides finales, rápidas y ultrarrápidas)
- Archivos de reloj
- Archivos de mallas globales diarias con los coeficientes de entrada para la (VMF)
- Archivo para el modelado de las cargas oceánicas
- Archivo para el modelado atmosférica de origen marial

La segunda etapa corresponde al procesamiento de datos, que se realizó en el software científico Bernese 5.2, donde se procesaron archivos GNSS solo de la constelación GPS. Esta etapa se divide en dos, el preprocesamiento y procesamiento. El preprocesamiento consiste en el cambio de formato GNSS a formato compatible Bernese y la depuración de código y fase. Luego en el procesamiento se utiliza la metodología de Posicionamiento de Punto Preciso (PPP), que lleva a la materialización de las coordenadas al marco de referencia que será ITRF 2020.

En la tercera etapa de análisis, se compararán las soluciones individuales de cada estación, obtenidas a través del procesamiento en el software Bernese 5.2, con las soluciones semanales de SIRGAS. A través de la estadística descriptiva, se procederá a comparar las

diferentes soluciones obtenidas de las efemérides precisas (finales, rápidas y ultrarrápidas) y sus tiempos de procesamiento.

Descarga y tratamiento de datos GNSS

Selección de las Estaciones de monitoreo continuo de la REGME

Para la selección de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME, solo se tuvo en cuenta la disponibilidad de los archivos RINEX. Es decir, se tomaba en cuenta solamente las estaciones activas de la REGME durante el período de estudio. En la tabla a continuación se muestra las 27 estaciones seleccionadas para el proyecto de investigación:

Tabla 8

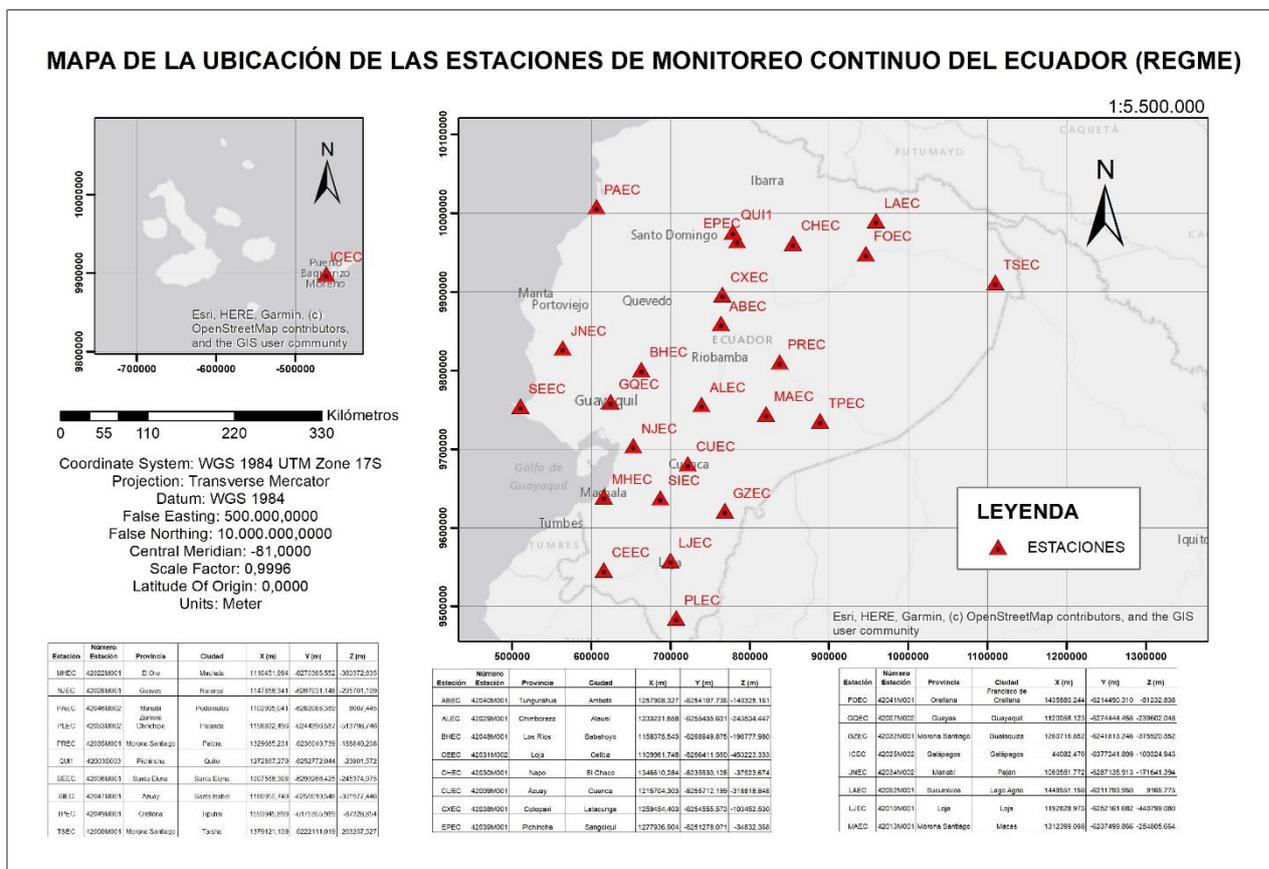
26 estaciones de monitoreo continuo del Ecuador seleccionados para el procesamiento de soluciones semanales

| Estación | Número Estación | Provincia | Ciudad | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------------|--------------|-------------|
| ABEC | 42040M001 | Tungurahua | Ambato | 1257908,327 | -6254107,736 | -140325,161 |
| ALEC | 42029M001 | Chimborazo | Alausí | 1233231,858 | -6255435,601 | -243534,447 |
| BHEC | 42048M001 | Los Ríos | Babahoyo | 1158375,543 | -6268949,875 | -198777,980 |
| CEEC | 42031M002 | Loja | Celica | 1109961,748 | -6266411,560 | -453223,333 |
| CHEC | 42030M001 | Napo | El Chaco | 1346610,284 | -6235930,128 | -37523,674 |
| CUEC | 42009M001 | Azuay | Cuenca | 1215704,303 | -6255712,199 | -318818,848 |
| CXEC | 42038M001 | Cotopaxi | Latacunga | 1259454,403 | -6254555,573 | -103452,530 |
| EPEC | 42039M001 | Pichincha | Sangolquí | 1277936,904 | -6251278,071 | -34832,368 |
| FOEC | 42041M001 | Orellana | Francisco de Orellana | 1435880,244 | -6214490,310 | -51232,838 |
| GQEC | 42007M002 | Guayas | Guayaquil | 1120058,123 | -6274444,458 | -239602,048 |
| GZEC | 42032M001 | Morona Santiago | Gualaquiza | 1260716,852 | -6241813,246 | -375920,552 |
| ICEC | 42025M002 | Galápagos | Galápagos | 44082,470 | -6377241,809 | -100324,943 |
| JNEC | 42034M002 | Manabí | Paján | 1060551,772 | -6287135,913 | -171641,394 |
| LAEC | 42052M001 | Sucumbíos | Lago Agrio | 1448551,150 | -6211793,950 | 9166,775 |
| LJEC | 42010M001 | Loja | Loja | 1192828,973 | -6252161,682 | -440799,080 |
| MAEC | 42013M001 | Morona Santiago | Macas | 1312399,098 | -6237499,866 | -254805,664 |
| MHEC | 42022M001 | El Oro | Machala | 1110451,994 | -6270365,552 | -360372,635 |

| | | | | | | |
|------|-----------|---------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| NJEC | 42028M001 | Guayas | Naranjal | 1147858,341 | -6267031,148 | -295701,109 |
| PAEC | 42046M002 | Manabí | Pedernales | 1102995,041 | -6282088,369 | 8007,445 |
| PLEC | 42033M002 | Zamora Chinchipe | Palanda | 1198892,496 | -6244396,587 | -513798,746 |
| PREC | 42035M001 | Morona Santiago | Palora | 1329685,231 | -6236040,739 | -188840,208 |
| QUI1 | 42003S003 | Pichincha | Quito | 1272867,279 | -6252772,044 | -23801,572 |
| SEEC | 42036M001 | Santa Elena | Santa Elena | 1007568,308 | -6293266,425 | -245374,975 |
| SIEC | 42047M001 | Azuay | Santa Isabel | 1180956,740 | -6259010,548 | -361977,446 |
| TPEC | 42049M001 | Orellana | Tiputini | 1593945,890 | -6175355,989 | -87328,854 |
| TSEC | 42050M001 | Morona Santiago | Taisha | 1379121,139 | -6222111,019 | -263257,527 |

Figura 10

Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador



Selección de las Estaciones fiduciales

Dentro de la investigación además se necesitan estaciones internacionales pertenecientes a la red SIRGAS-CON que permita el vínculo al marco de referencia SIRGAS. Para la selección

de las estaciones fiduciales se tomó en cuenta la disponibilidad de datos de las estaciones pertenecientes a SIRGAS y su cercanía a las estaciones de la REGME.

Tabla 9

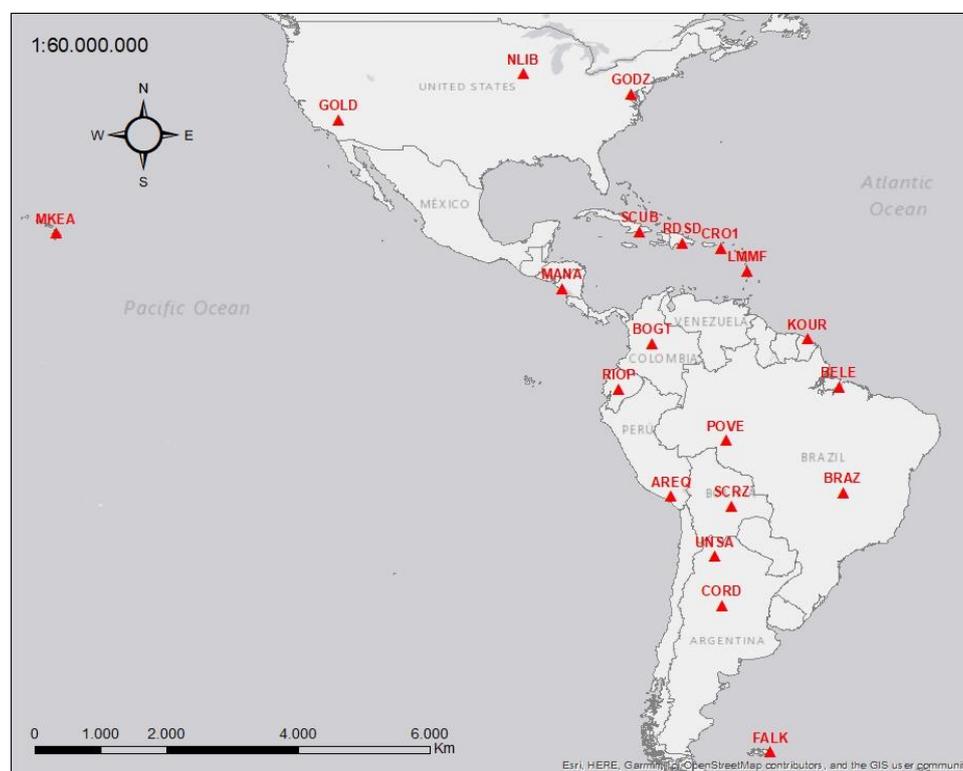
20 estaciones fiduciales de la red SIRGAS-CON

| Estación | Número Estación | País | Ciudad | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|-----------------|------------------------|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AREQ | 42202M0 05 | Perú | Arequipa | 194282 6,301 | - 5804070, 359 | - 1796894, 089 |
| BELE | 41622M0 01 | Brasil | Belem | 422813 8,975 | - 4772752, 141 | - 155761,0 87 |
| BOGT | 41901M0 01 | Colombia | Bogotá | 174439 8,871 | - 6116037, 000 | - 512731,9 38 |
| BRAZ | 41606M0 01 | Brasil | Brasilia | 411501 4,068 | - 4550641, 648 | - 1741443, 747 |
| CORD | 41511M0 01 | Argentina | Córdoba | 234550 3,866 | - 4910842, 942 | - 3316365, 209 |
| CRO1 | 43201M0 01 | USA | Saint Croix | 260777 1,344 | - 5488076, 536 | - 1932767, 991 |
| FALK | 80602M0 01 | Reino Unido | Islas Malvinas | 210681 1,415 | - 3355170, 770 | - 4981786, 217 |
| GODZ | 40451M1 23 | USA | Greenbelt | 113077 3,488 | - 4831253, 570 | - 3994200, 463 |
| GOLD | 40405S0 31 | USA | Goldstone | - 235361 4,544 | - 4641385, 247 | - 3676976, 368 |
| KOUR | 97301M2 10 | Kourou | Guayana Francesa | 383959 1,317 | - 5059567, 585 | - 579957,2 53 |
| LMMF | 97205M0 01 | Martinica | Le Lamentin | 299338 7,415 | - 5399363, 802 | - 1596748, 195 |
| MANA | 41201S0 01 | Nicaragua | Managua | 407981, 962 | - 6222925, 640 | - 1333529, 115 |
| MKEA | 40477M0 01 | USA | Mauna Kea | - 546410 5,434 | - 2495165, 321 | - 2148291, 730 |
| NLIB | 40465M0 01 | USA | North Liberty | - 130934, 872 | - 4762291, 681 | - 4226854, 599 |

| | | | | | | |
|------|---------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| POVE | 41628M0 01 | Brasil | Porto Velho | 277426 5,582 | - 5662060, 190 | - 959415,7 23 |
| RDSD | 40805M0 01 | República Dominicana | Santo Domingo | 207867 8,924 | - 5683737, 228 | - 2006886, 980 |
| RIOP | 42006M0 01 | Ecuador | Riobamba | 125514 4,947 | - 6253609, 437 | - 182569,6 71 |
| SCRZ | 41801M0 01 | Bolivia | Santa Cruz de la Sierra | 274300 5,913 | - 5420745, 276 | - 1937116, 964 |
| SCUB | 40701M0 01 | Cuba | Santiago de Cuba | 147453 7,990 | - 5811243, 261 | - 2168958, 895 |
| UNSA | 41514M0 01 | Argentina | Salta | 241283 0,485 | - 5271936, 792 | - 2652208, 846 |

Figura 11

Ubicación de las estaciones fiduciales de la red SIRGAS-CON



Recopilación de archivos GNSS

RINEX.

Una vez seleccionada las estaciones de la REGME, procedemos a descargar los archivos RINEX de observación de cada uno, en el período de enero - abril del 2022. Los archivos RINEX de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador están disponibles en la página del Instituto Geográfico Militar (IGM) de datos GNSS de libre acceso: <https://www.geoportaligm.gob.ec/downloads/public/register>. Para acceder a los datos del geoportal, primero, se debe crear una cuenta en la página registrando su correo electrónico y datos personales. De esta manera se puede ingresar al sistema y se habilita la descarga de los archivos RINEX (archivos meteorológicos, navegación y de observación). Es importante conocer que el sistema solo acepta una cuota diaria de 5 descargas. Se descargaron los archivos RINEX de observación de 30 segundos de intervalo de 26 estaciones de la red. Y por último la estación RIOP al pertenecer a la red IGS, sus datos se descargaron de la CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) de la NASA (NASA'S Archive of Space Geodesy Data).

Los archivos de observación descargados tienen doble compresión ZIP + Hatanaka (.22D.Z), se utilizó un script con el comando GZIP para descomprimir ZIP y con el comando CRX2RNX para descomprimir Hatanaka, como se observa en la figura, dando como resultado un archivo RINEX de observación (.22O).

Figura 12

Script para descomprimir la doble compresión (ZIP+Hatanaka)

```

1 @ECHO OFF
2
3 REM Mes Enero
4
5 REM Semana 2191
6
7 gzip -d *.22D.Z
8
9 crx2rnx ALEC0010.22d
10 crx2rnx ABEC0010.22d
11 crx2rnx BHEC0010.22d
12 crx2rnx CEEC0010.22d
13 crx2rnx CXEC0010.22d
14 crx2rnx CUEC0010.22d
15 crx2rnx CHEC0010.22d
16 crx2rnx EPEC0010.22d
17 crx2rnx FOEC0010.22d
18 crx2rnx GZEC0010.22d
19 crx2rnx GQEC0010.22d
20 crx2rnx LAEC0010.22d
21 crx2rnx LJEC0010.22d
22 crx2rnx MAEC0010.22d
23 crx2rnx MHEC0010.22d

```

Se realizó un segundo script con el comando GFZRNX como se muestra en la figura, para filtrar solo la información GPS y eliminar información innecesaria para esta investigación, con el fin de optimizar la estación y la memoria del CPU, ya que son más de tres mil archivos de observación que serán procesados, en la figura se muestra una comparativa de pesos de un archivo de observación.

Figura 13

Script para filtrar información GPS

```

1 @ECHO OFF
2 gfzrnx -finp ALEC0010.22o -fout ALEC0010.20 -satsys G --version_out 2
3 gfzrnx -finp ABEC0010.22o -fout ABEC0010.20 -satsys G --version_out 2
4 gfzrnx -finp BHEC0010.22o -fout BHEC0010.20 -satsys G --version_out 2
5 gfzrnx -finp CEEC0010.22o -fout CEEC0010.20 -satsys G --version_out 2
6 gfzrnx -finp CXEC0010.22o -fout CXEC0010.20 -satsys G --version_out 2
7 gfzrnx -finp CUEC0010.22o -fout CUEC0010.20 -satsys G --version_out 2
8 gfzrnx -finp CHEC0010.22o -fout CHEC0010.20 -satsys G --version_out 2
9 gfzrnx -finp EPEC0010.22o -fout EPEC0010.20 -satsys G --version_out 2
10 gfzrnx -finp FOEC0010.22o -fout FOEC0010.20 -satsys G --version_out 2
11 gfzrnx -finp GZEC0010.22o -fout GZEC0010.20 -satsys G --version_out 2
12 gfzrnx -finp GQEC0010.22o -fout GQEC0010.20 -satsys G --version_out 2
13 gfzrnx -finp LAEC0010.22o -fout LAEC0010.20 -satsys G --version_out 2
14 gfzrnx -finp LJEC0010.22o -fout LJEC0010.20 -satsys G --version_out 2
15 gfzrnx -finp MAEC0010.22o -fout MAEC0010.20 -satsys G --version_out 2
16 gfzrnx -finp MHEC0010.22o -fout MHEC0010.20 -satsys G --version_out 2

```

Figura 14

Comparación de peso de un archivo de observación mixta y de observación GPS

| 2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE | | | | | | | | | | 2.11 OBSERVATION DATA G | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----|----|----|----|--|-------------------------|----|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----|----|----|----|--|--|
| 1 | cnvrtORINEX 3.07.0 | convertORINEX OPR | 07-Dec-21 14:05 UTC | COMMENT | | | | | | | 1 | cnvrtORINEX 3.07.0 | CEPGE IGM | 03-Jan-22 12:56 UTC | PRN / RUN BY / DATE | | | | | | |
| 2 | cnvrtORINEX 3.07.0 | CEPGE-IGM | 07-Dec-21 14:05 UTC | PRN / RUN BY / DATE | | | | | | | 2 | gizrnk 1.16 8177 | FILE PROCESSING | 20220910 021032 UTC | COMMENT | | | | | | |
| 3 | sfFile=1.15-0044 | FILE PROCESSING | 20211207 141220 UTC | COMMENT | | | | | | | 3 | ABEC | | | | | | | | | |
| 4 | ABEC | | | | | | | | | | 4 | ABEC | | | | | | | | | |
| 5 | 42040M001 | | | | | | | | | | 5 | 42040M001 | | | | | | | | | |
| 6 | RECME | IGM-Ec/CEPGE | | | | | | | | | 6 | RECME | IGM-Ec/CEPGE | | | | | | | | |
| 7 | 6032840028 | TRIMBLE ALLOY | 6.12 | | | | | | | | 7 | 6032840028 | TRIMBLE ALLOY | 6.12 | | | | | | | |
| 8 | 08354399 | TRM59800.00 | SCIS | | | | | | | | 8 | 08354399 | TRM59800.00 | SCIS | | | | | | | |
| 9 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | | | | | | | | 9 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | | | | | | | |
| 10 | 1287907.0630 | -6254105.1922 | -140326.1134 | | | | | | | | 10 | 1287907.0630 | -6254105.1922 | -140326.1134 | | | | | | | |
| 11 | 7 | C1 | C2 | C5 | L1 | L2 | L5 | P2 | | | 11 | 7 | C1 | C2 | C5 | L1 | L2 | L5 | P2 | | |
| 12 | | | | | | | | | | | 12 | cnvLTOINEX 3.07.0 | convertLTOINEX OPR | 03-Jan-22 12:56 UTC | COMMENT | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | 13 | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | 14 | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | 15 | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | 16 | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | 17 | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | 19 | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | 20 | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | 21 | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | 22 | | | | | | | | | | |

| ARCHIVO CON OBSERVACIÓN MIXTA | | ARCHIVO CON OBSERVACIÓN GPS | |
|-------------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|
| ABEC0010.220 | 13/6/2022 16:48 | ABEC0010.220 | 9/5/2022 21:10 |
| 7.697 KB | | 3.994 KB | |
| 79 | | 31 | |

Efemérides y relojes precisos.

Los archivos de efemérides finales y de reloj se descargaron de la página oficial de la NASA CDDIS (NASA'S Archive of Space Geodesy Data): <https://cddis.nasa.gov/>, en la interfaz de datos y productos GNSS, donde los archivos de orbitas precisas, se publican en un tiempo entre 12 a 18 días después del día de observación y se las identifican como IGS, las orbitas rápidas se publican en un tiempo de 17 a 41 horas después del paso del satélite y se las identifican como IGR, estas orbitas (precisas y rápidas) están en un intervalo de 15 minutos, para las orbitas ultrarrápidas se publica cada 6 horas a las 00, 06, 12 y 18 horas en el tiempo universal coordinado (UTC), cada una contiene información de 48 horas, de las cuales 24 son previas y las otras 24 son posteriores y se las identifican como IGU, para el análisis de las orbitas ultrarrápidas (IGU) se utilizó el archivo de las 18 horas y se filtró la información a 24 horas del día respectivo.

Se utilizo un script en Notepad++, con el comando "SED", que permite buscar y reemplazar un texto en un archivo y eliminar líneas del archivo, en el script se buscó y se reemplazó la fecha, la semana GPS de la cabecera del archivo y se eliminó información de las orbitas ultrarrápidas para que este a 24 horas, como se muestra en la figura a continuación.

Figura 15

Script para modificar la cabecera y eliminar información de los archivos de orbitas ultrarrápidas (IGU)

```

1 @ECHO OFF
2 gzip -d *.exp.Z
3 gzip -d *.sp3.Z
4
5 sed -i "s/12 31 18 0 0.00000000 192 ORBIT/1 1 0 0 0.00000000 96/" igu21906_18.sp3
6 sed -i "s/## 2190/## 2191/" igu21906_18.sp3
7 sed -i "s/900.00000000 59579 0.7500000000000/900.00000000 59580 0.0000000000000/" igu21906_18.sp3
8 sed -i "s/ P P/ /" igu21906_18.sp3
9 sed -i "23,814d" igu21906_18.sp3
10 sed -i "3191,5566d" igu21906_18.sp3
11
12 ren igu21906_18.sp3 IGU21906.SP3

```

Cabe mencionar para los productos de reloj solo están disponibles los finales y rápidos, para esta investigación solo se utilizaron productos de reloj finales de un intervalo de 30 segundos. En cambio, para el procesamiento con orbitas rápidas y ultrarrápidas, se generará un archivo de relojes con los datos del archivo de orbitas de su respectiva clase.

Procesamiento en el Software Bernese 5.2

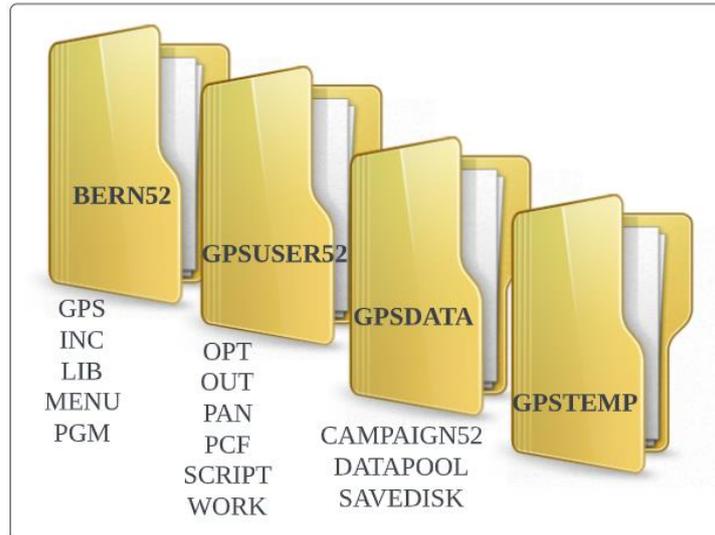
Estructura del Directorio

El software científico Bernese se compone de cuatro directorios principales como se muestra en la figura y se describen a continuación

- BERN52: En esta carpeta se almacenan las libretas, archivos generales necesarios para el procedimiento, los ejecutables de cada script.
- GPSDATA: En este directorio se almacenan las campañas a procesar.
- GPSUSER52: Contiene información necesaria para el procesamiento automático
- GPSTEMP: En esta carpeta almacena archivos temporales para el BPE (proceso automático)

Figura 16

Directorios que conforman el software científico Bernese versión 5.2



Estructura del Programa

El software GNSS Bernese consta de más de 450.000 líneas de código fuente en unos 1.500 módulos. El menú del programa actúa como interfaz de usuario para la mayoría de los más de 100 programas que posee Bernese. Estos programas se activan a través de menús desplegables que reflejan las partes principales del software. Estos menús desplegables se encuentran en la parte superior de la pantalla principal del programa, se puede visualizar dicha pantalla en la figura siguiente.

Figura 17

Pantalla Principal del Programa Bernese Versión 5.2



Dentro del menú del programa existen 6 partes principales del software, las cuales son la Parte de Transferencia, Parte de conversión, Parte de órbita, Parte de Procesamiento, Parte de Simulación y Parte de Servicio. A continuación, se describirá cada uno de estas partes detallando sus funciones:

Parte de Transferencia (“Menú>RINEX”): Dentro de esta parte, se incluye todos los programas relacionados a la transferencia de archivos RINEX (archivos de observación, archivos de navegación, archivos meteorológicos, archivos de reloj) a archivos en formato Bernese o viceversa. Además, incluye opciones para la manipulación de los archivos RINEX, como cortar a una ventana de tiempo específica o concatenación de archivos. Las herramientas de RINEX permiten extraer información de cabecera, generar información estadística u observaciones de preproceso a nivel de RINEX.

Parte de Conversión (“Menú>Conversion”): Esta parte consta de todos los programas que convierten archivos binarios en archivos de formato ASCII y viceversa. Al igual posee otros programas que convierten archivos SINEX en archivos de ecuaciones normales o programas que manipulan los archivos troposféricos SINEX.

Parte de Órbita (“Menú>Orbits/EOP”): Contiene todos los programas relacionados a las órbitas de satélite y EOP (Parámetros de Orientación Terrestre o por sus siglas en inglés Earth Orientation parameter). Esto incluye la generación de una representación de órbita interna o también llamado órbita estándar a través de efemérides precisas, actualización de información de órbita, la creación de archivos de órbita, la concatenación de archivos de órbita precisa, comparación de órbitas, entre otras funciones.

Parte de Procesamiento (“Menú>Processing”): Esta parte contiene los programas principales de procesamiento. Incluye el preprocesamiento de código y sincronización del receptor, generación de archivos de referencia, preprocesamiento en fase de frecuencia simple o doble. La estimación de parámetros principales basada en observaciones GPS y/o GLONASS o SLR (programa GPSEST) y en la superposición de sistemas de ecuaciones normales (programa ADDNEQ2) son los programas más significativos de la parte y del paquete de software en su conjunto.

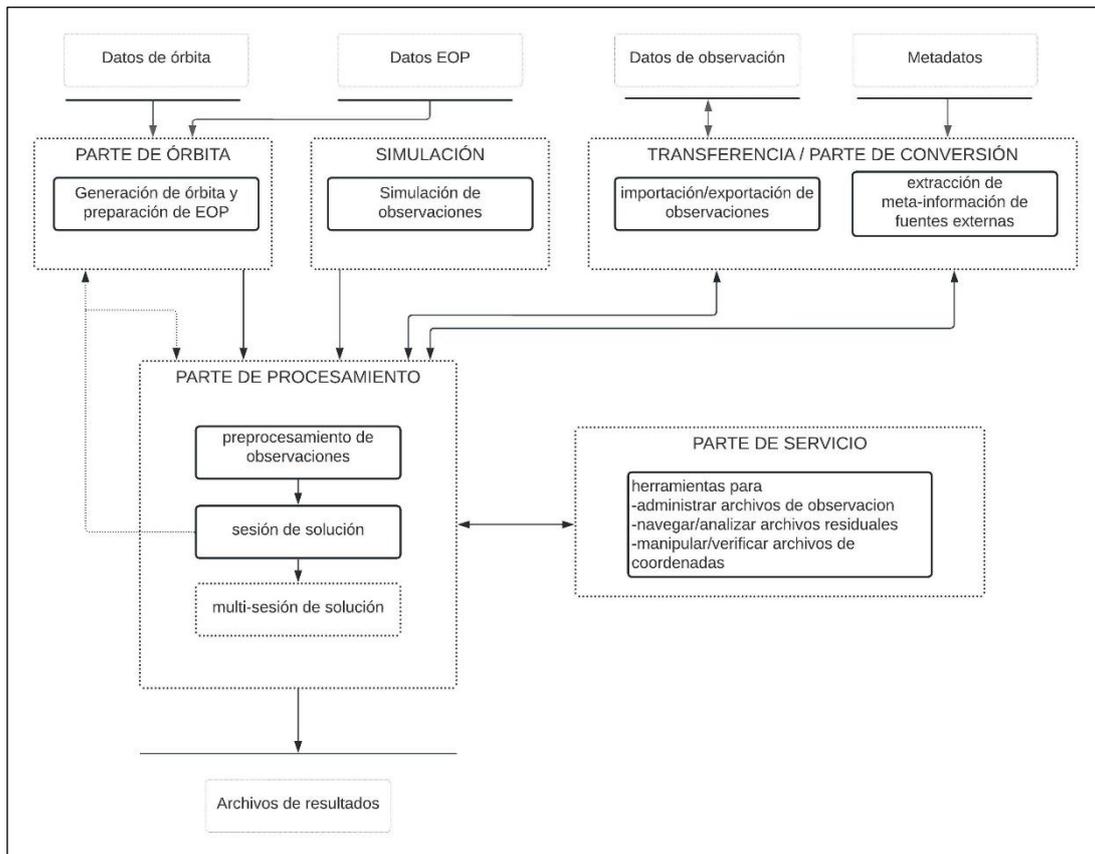
Parte de Simulación (“Menú>Service>Generate simulated observation data”): La parte de simulación consiste de un programa que genera observaciones GPS y GLONASS simuladas (código y/o fase, L1 o L1/L2) basado en información estadística.

Parte de Servicio (“Menú>Service”): La última parte es una colección de herramientas para manipular archivos de información de estaciones, editar, examinar y manipular archivos binarios de observación, verificar residuos, comparar y manipular coordenadas, y para procesamiento automatizado.

Figura 18

Diagrama de flujo funcional de un procesamiento estándar en Bernese GNSS Software

Versión 5.2



Nota: Recuperado de (Dach et al., 2015)

Como ya se había mencionado, existe el BPE (“Menú>BPE”) que es la herramienta encargada del procesamiento automatizado y que opera por encima de todas las partes principales descritas en esta sección. La figura consta de un flujo funcional de un procesamiento estándar en Bernese que puede o no ser automatizado por el BPE.

Preparación de la campaña

El procesamiento del software bernese está orientado a campañas, todos los archivos de entrada y resultados se leen o se escriben en subcarpetas de la carpeta de la campaña, de igual manera es importante definir la semana y el día GPS, del cual se vaya a procesar.

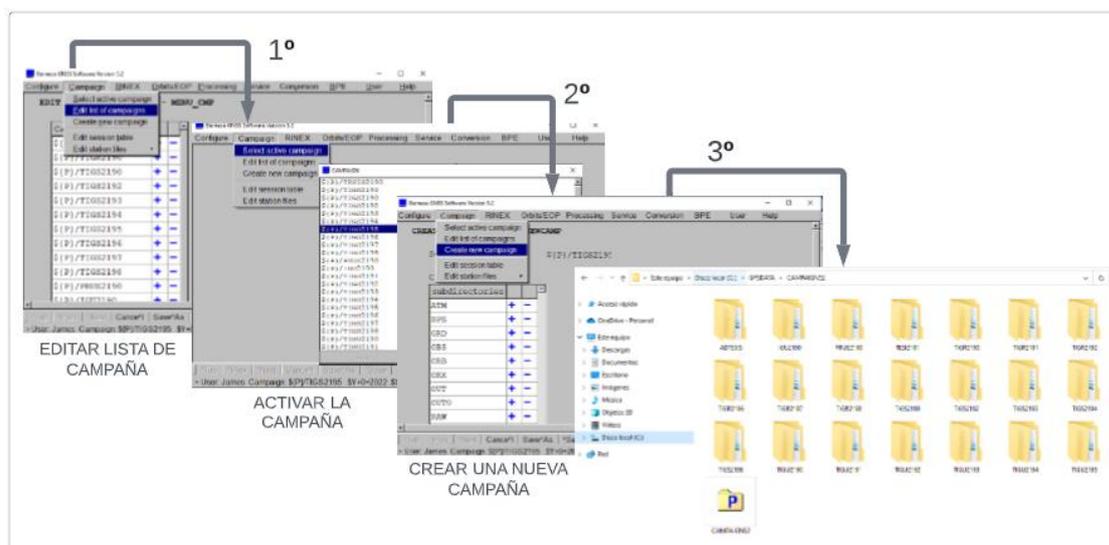
Para la creación de una campaña, los pasos que se deben seguir son: primero añadir el nombre a la lista de campañas activas, la ruta es: MENU>CAMPAIGN>EDIT LIST OF CAMPAIGNS, una vez modificado se guardan los cambios.

Posteriormente se debe activar la dirección de la campaña creada con la ruta: MENU>CAMPAING>SELECT ACTIVE CAMPAING.

Para finalizar se crea la campaña mediante la ruta: MENU>CAMPING>CREATE NEW CAMPAING, con todos los subdirectorios colocados se oprime RUN, lo que genera automáticamente las subcarpetas para que se coloquen los archivos de entrada, se ubica en GPSDATA>CAMPING> CARPETA CON EL NOMBRE ELEJIDO, como se muestra en la figura 19.

Figura 19

Pasos para la creación de una campaña en el software Bernese



La ruta para definir o modificar la semana o día GPS es: MENU>CONFIGURE>SET SESSION/COMPUTE DATE, sirve para identificar una tabla de sesión (session table) que se compone de 4 caracteres (dddc), donde ddd representa el día del año (DOY) del comienzo del intervalo de tiempo y c es un carácter alfanumérico la identificación de la sesión dentro del día.

Figura 20

Cuadro de diálogo para definir la fecha de procesamiento (día o semana GPS)

Preparación de los archivos de entrada para el procesamiento

En la carpeta GEN que se encuentra en el directorio BERN52/GPS/GEN, se ubican los datos generales necesarios para un procesamiento adecuado, se descargan en la página oficial de Berna <http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/GEN/>, para esta investigación se actualizaron los datos generales más actuales que se encontraron en la fecha del 29 abril del 2022, como son archivos de: efemérides, receptores, antenas, satélites, modelos de nutación, entre otros, una vez actualizados servirá para el procesamiento de todas las campañas.

Tabla 10

Archivos generales del servidor ftp CODE (Center for Orbit Determination in Europe) utilizadas en el procesamiento Bernese

| Nombre de archivo | Descripción |
|--------------------------|--|
| PCV_COD.I14 | Lista de variaciones del centro de fase de antenas derivados de archivos ANTEX |
| CONST | Constantes generales del Software Bernese GNSS versión 5.2 |
| DATUM_ | Lista de definiciones de datum del Software Bernese GNSS versión 5.2 |
| RECEIVER_ | Lista de archivos de información de receptores del Software Bernese GNSS versión 5.2 |

| | |
|----------------|---|
| SAT_YYYY.CRX | Lista de problemas satelitales |
| SATELLITE.I14 | Lista de información específica de satélites |
| TIDE2000.TPO | Dependencia de la frecuencia del modelo de marea de tierra sólida |
| IAU2000R06.NUT | Coefficientes del modelo de nutación |
| IERS2010XY.SUB | Coefficientes del modelo de polo subsidiario |
| OT_FES2004.TID | Coefficientes de marea oceánica |

Nota: Recuperado de (Abdallah, 2016)

Igualmente se debe ingresar los archivos de entrada a cada campaña, se encuentran guardados en el directorio GPSDATA, en la carpeta CAMPAIGN52, dentro se hallan subcarpetas nombradas a criterio personal, para esta investigación se las llamo TIGS\$\$\$\$ para el procesamiento con efemérides precisas, TIGR\$\$\$\$ para el procesamiento con efemérides rápidas y TIGU\$\$\$\$ para el procesamiento con efemérides ultrarrápidas, seguido con la semana GPS respectivamente, con un total de 54 subcarpetas, en el interior de cada una de estas se encuentran 11 directorios, una representación se muestra en la figura, donde deben ser llenados con archivos de entrada para la realización del procesamiento de datos (\$\$\$\$=semana GPS a procesar).

Figura 21

Estructura de los directorios de cada campaña a procesar



En la tabla se detalla brevemente el contenido de cada directorio, los archivos de entrada que debe contener y donde se puede obtener dichos archivos.

Tabla 11

Descripción de los principales directorios de una campaña de procesamiento.

| Directorio | Contenido | ¿Dónde se obtienen los archivos? |
|------------|--|--|
| | - Modelos ionosféricos de entrada(.ION) | - Los Modelos ionosféricos diarios se puede conseguir en la página http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE |
| ATM | -Modelos troposféricos de entrada o salida (.TRP) | - Los Modelos troposféricos se obtienen mediante el procesamiento o de la página https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/ |
| BPE | -Contiene los archivos que genera el modo automático | -Se genera en el procesamiento |
| GRD | -Mallas globales diarias con los coeficientes de | -Se obtiene de https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/2.5x2/VMF1/VMF1_OP/ |

| | | |
|-----|---|--|
| | entrada para la Vienna Mapping Funtion (VMF) | -Estos datos están distribuidos en intervalos de 6 horas, por cada día se debe tener 4 archivos más el primero del siguiente día, estos archivos se deben unificar |
| OBS | Mediciones en formato Bernese | -Se genera en el procesamiento |
| | Contiene: - archivos de orbita (finales, rápidas y ultrarrápidas) (.SP3) | -Se obtiene de https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ |
| | Archivos de reloj (.CLK) | |
| ORB | Parámetros de rotación de la tierra (.ERP) | |
| | Archivo de diferencia de código (.DCB) | -Se obtiene de https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias/ |
| | Efemérides tabulares(.TAB) | -Se genera en el procesamiento |
| | Órbitas estándar(.STD) | -Se genera en el procesamiento |
| OBX | Contiene los archivos RINEX | -Se genera en el procesamiento |

| | | |
|------|--|--|
| | descargados por el software | |
| OUT | Reportes de cálculo del preanálisis, solución diaria y solución semanal | -Se genera en el procesamiento |
| OUT0 | Reportes de cálculo de la preparación y preprocesamiento o | -Se genera en el procesamiento |
| RAW | Contiene los archivos RINEX de monitoreo continuo (archivos de observación) | -Se obtienen de bancos de datos de la REGME y del IGS |
| SOL | Contiene los archivos de salida SINEX de las soluciones de coordenadas (.SNX) | -Se genera en el procesamiento |

Contiene las
ecuaciones
normales (.NQ0)

Contiene
archivos de
información de
las estaciones: -
Coeficientes
para el
modelado de la
carga oceánica -Se puede pedir en la página
(.BLQ) <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>

STA

-Coeficientes
para el
modelado de la
carga
atmosférica de -Se puede pedir en la página
origen mareal [https://geophy.uni.lu/atmosphere/tide-loading-
calculator/ATM1OnlineCalculator/](https://geophy.uni.lu/atmosphere/tide-loading-calculator/ATM1OnlineCalculator/)
(.ATL)

- Archivo de
información del
conjunto de
estaciones a -Se obtiene de
procesar (.STA) <http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/STA/>

- Archivo de las
coordenadas
aproximadas de

las estaciones
 (.CRD)

- Archivo de
 velocidades de
 las estaciones
 (.VEL)

-Archivo de
 abreviaciones
 para cada
 estación (.ABB)

En los directorios BPE, OBS, ORX, OUT, OUT0 y SOL, no se coloca ningún archivo de entrada, ya que estas carpetas sirven para los archivos que se generan durante el procesamiento, los directorios que se llenaron para esta investigación son:

- La carpeta GRD con las mallas globales diarias para la Vienna Mapping Function, donde se realizó un script para unificar los archivos descargados cada 6 horas (4 archivos), más el primero del siguiente día, el nombre de archivo de salida debe estar en mayúsculas, su inicial con VMF e identificar la semana con el día de la semana como se puede ver en la figura 22.

Figura 22

Script para unificar los archivos diarios para la Vienna Mapping Function (VMF)

```

1  @ECHO OFF
2
3  copy VMFG_20220102.H00+VMFG_20220102.H04+VMFG_20220102.H12+VMFG_20220102.H18+VMFG_20220103.H00 VMF21910.GRD
4  copy VMFG_20220103.H00+VMFG_20220103.H04+VMFG_20220103.H12+VMFG_20220103.H18+VMFG_20220104.H00 VMF21911.GRD
5  copy VMFG_20220104.H00+VMFG_20220104.H04+VMFG_20220104.H12+VMFG_20220104.H18+VMFG_20220105.H00 VMF21912.GRD
6  copy VMFG_20220105.H00+VMFG_20220105.H04+VMFG_20220105.H12+VMFG_20220105.H18+VMFG_20220106.H00 VMF21913.GRD
7  copy VMFG_20220106.H00+VMFG_20220106.H04+VMFG_20220106.H12+VMFG_20220106.H18+VMFG_20220107.H00 VMF21914.GRD
8  copy VMFG_20220107.H00+VMFG_20220107.H04+VMFG_20220107.H12+VMFG_20220107.H18+VMFG_20220108.H00 VMF21915.GRD
9  copy VMFG_20220108.H00+VMFG_20220108.H04+VMFG_20220108.H12+VMFG_20220108.H18+VMFG_20220109.H00 VMF21916.GRD
10

```

- La carpeta ORB se colocó los archivos de parámetros de rotación de la tierra (.ERP), los archivos (.SP3), dependiendo con que efemérides se vaya a procesar(finales, rápidas o ultrarrápidas) y respetando el nombre de la campaña, de igual manera con

los productos de reloj, cabe mencionar que los únicos archivos de entrada son los archivos de reloj finales a 30 segundos para el procesamiento con efemérides finales, para el procesamiento con efemérides rápidas y ultrarrápidas se obtendrán del procesamiento con las orbitas respectivamente.

- La carpeta RAW se colocó los archivos RINEX una vez realizado todo el tratamiento, los archivos están con sus iniciales de la estación en mayúsculas y su día GPS.
- La carpeta STA se colocó los archivos que contiene los coeficientes para el modelado de carga oceánica (.BBQ) y carga atmosférica (.ATL), ambos descargados de las instituciones mencionadas en la tabla , los archivos (.STA), (.CRD) y (.ABB), se modificaron de los EXPLAMES que proporciona el Bernese, añadiendo toda la información de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME que se va a procesar, el nombre de estos archivos es TESIS con su respectiva extensión (BBQ, ATL, STA, CRD, ABB), el archivo SESSIONS.SES se genera una vez creado la campaña.

BPE (Bernese Processing Engine)

Para el procesamiento de datos GNSS, el software Bernese brinda dos opciones de forma manual o de forma automática. La forma manual el usuario ejecuta cada ruta de procesamiento de manera secuencial accediéndolo por medio del menú principal. El BPE por sus siglas en inglés, es la manera automatizada de realizar el procesamiento de datos, se programa una serie de rutas con los insumos requeridos, con la finalidad de optimizar el tiempo sobre todo cuando se trabaja con una gran cantidad de datos GNSS, el método automático se utilizó en el presente proyecto.

El BPE es una parte integrada del sistema de menú del Software Bernese a partir de la versión 5. A través de una lista de tareas denominado Process Control File (PCF) se puede ejecutar un BPE. Es una herramienta muy útil de altos elogios y forma parte del procesamiento rutinario de la red de la IGS global por parte del Centro de Análisis de la CODE desde 1995.

Definición del Process Control File (PCF)

El archivo de control de procesos (PCF) define una lista de scripts que deben ejecutarse secuencialmente o en paralelo por el Bernese Processing Engine (BPE). El PCF es un archivo ASCII y se lo puede editar con un editor compatible al tipo de archivo o se lo puede editar mediante el menú desplegable “Menú>BPE>Edit process control file (PCF)”.

El PCF consiste de tres secciones. Cada sección comienza con una cabecera y una línea de formato. Dentro de la primera sección, el cual se muestra como tal en la figura, el usuario comienza a editar:

- Dentro de la columna “Script”, el usuario especifica el nombre de los programas o scripts que desea correr y al igual debe asignar un número PID (Process Identifier) a cada uno de ellos.
- La columna “Opt_dir” detalla el nombre del directorio de opción (GPSUSER52/OPT), el cual contiene los archivos de entrada de los programas de procesamiento y del menú de configuración.
- Como siguiente, la columna “Campaign” identifica el nombre de la campaña donde el script debe ser procesado. Por lo general este campo está vacío ya que el script corre en la campaña actual del BPE, que fue definido al inicio del procesamiento.
- La columna “CPU” describe el nombre de la computadora/cola a la cual el script debe ser enviado. En este caso se utiliza el nombre “ANY”, que manda el script a la primera computadora disponible para el procesamiento encontrado en la lista CPU.
- Por consiguiente, la columna “F” está reservado para los indicadores. Hasta el momento solo existe un indicador llamado Singleton (S) para procesamientos de multisesión.
- Los campos restantes especifican el número de PID del script a terminarse, antes de que pueda comenzar un nuevo script.

Figura 23

Archivo de Control de Procesos (PCF)

| Program | IGS | Script |
|--------------|---------|------------|
| 001 CCRNXC | IGS_CLK | CCRNXC.INP |
| 009 POLUPD | IGS_ORB | POLUPD.INP |
| 010 PRETAB | IGS_ORB | PRETAB.INP |
| 011 ORBGEN | IGS_ORB | ORBGEN.INP |
| 031 RXOBV3_P | IGS_RXO | RXOBV3.INP |
| 101 CODSPP_P | IGS_CSP | CODSPP.INP |
| 102 CODXTR | IGS_CSP | CODXTR.INP |
| 121 MAUPRP_P | IGS_MPR | MAUPRP.INP |
| 141 PPPEDT_P | IGS_EDT | GPSEST.INP |
| 141 PPPEDT_P | IGS_EDT | RESRMS.INP |
| 141 PPPEDT_P | IGS_EDT | SATMRK.INP |
| 141 PPPEDT_P | IGS_EDT | GPSEST.INP |
| 221 GPSEST | IGS_FIN | GPSEST.INP |

Tabla 12

Descripción de los programas que se usaron en el preprocesamiento para obtener soluciones semanales en Bernese

| Programa | Ruta | Descripción |
|----------|--|--|
| CCRNXC | Menu > Service > Clock tools > Combine/manipulate clock RINEX files | El objetivo principal del programa es convertir el archivo de reloj de formato IGS a formato Bernese. |
| POLUPD | Menu > Orbits/EOP > Handle EOP files > Convert IERS to Bernese Format | Conversión de los archivos parámetros de rotación terrestre (ERP) del formato IGS a formato Bernese. |
| PRETAB | Menu > Orbits/EOP > Create tabular orbits | Transforma los archivos de órbita (finales, rápidas y ultrarrápidas) a formato de órbita tabular, además el programa se puede usar |

| | | |
|----------|---|---|
| | | para extraer la información de reloj de los satélites y se escriben en un archivo de reloj formato Bernese. |
| ORBGEN | Menu > Orbits/EOP > Create/update standard orbits | Genera un archivo de órbita estándar (STD), es un archivo binario que contiene la información de la órbita del satélite como una representación polinomial de posiciones cartesianas inerciales. |
| RXOBV3_P | Menu > RINEX > Import RINEX to Bernese format > Observation file | Convierte los archivos de observación RINEX al formato de observación Bernese, se puede guardar observaciones de código o fase, también compara la información del encabezado del RINEX con el archivo de información de la estación (STA). |
| CODSPP_P | Menu > Processing > Code-based clock synchronization | El objetivo principal es sincronizar los relojes del receptor con la hora del GPS, además se utiliza para marcar valores atípicos de código de los archivos de observación Bernese. |
| CODXTR | Menu > Processing > Program output extraction > Code-based clock synchronization | Extrae información más importante del archivo de salida del programa CODSPP y escribe un archivo de resumen completo para eliminar archivos defectuosos, también se utiliza para eliminar relojes defectuosos de un archivo de relojes Bernese. |

MAUPRP_P

Menu > Processing >
Phase preprocessing

Preprocesamiento de las observaciones de fase, escanea las observaciones en busca de desplazamientos de ciclo, el programa detecta el desplazamiento e intenta corregir, si no se pudo corregir de manera confiable se eliminará el punto de datos como un valor atípico o introducirá un nuevo parámetro de ambigüedad.

Procesamiento PPP en Bernese

Una vez terminado el preprocesamiento de los insumos GNSS se procede a realizar el procesamiento de los datos depurados y resultados obtenidos. Al igual que en el anterior paso se utiliza el BPE por medio de un PCF para realizar el proceso. Se observa los programas a utilizar en la figura 25 y su descripción en la tabla 13.

Figura 25

Lista de programas utilizadas en el BPE para el procesamiento

| ID | Script Name | IGS Type | Input File |
|-----|-------------|----------|------------|
| 001 | CCRNXC | IGS_CLK | CCRNXC.INP |
| 009 | POLUPD | IGS_ORB | POLUPD.INP |
| 009 | POLUPD | IGS_ORB | POLUPD.INP |
| 010 | PRETAB | IGS_ORB | PRETAB.INP |
| 011 | ORBGEN | IGS_ORB | ORBGEN.INP |
| 031 | RXOBV3_P | IGS_RXO | RXOBV3.INP |
| 101 | CODSPP_P | IGS_CSP | CODSPP.INP |
| 102 | CODXTR | IGS_CSP | CODXTR.INP |
| 121 | MAUPRP_P | IGS_MPR | MAUPRP.INP |
| 141 | PPPEDT_P | IGS_EDT | GPSEST.INP |
| 141 | PPPEDT_P | IGS_EDT | RESRMS.INP |
| 141 | PPPEDT_P | IGS_EDT | SATMRK.INP |
| 141 | PPPEDT_P | IGS_EDT | GPSEST.INP |
| 221 | GPSEST | IGS_FIN | GPSEST.INP |

Buttons: ALL, OK, Cancel

Tabla 13

Descripción de los programas que se usaron en el procesamiento para obtener las soluciones semanales en Bernese

| Programa | Ruta | Descripción |
|-----------------|---|--|
| PPPEDTAP | BPE (ID de proceso) | El programa prepara la corrida paralela de GPSEST. |
| PPPEDT_P | BPE (ID de proceso) | Dentro de este proceso dentro del BPE, se realiza una corrida de los siguientes programas que realizan un proceso de limpieza de datos de todas las estaciones y calcula la solución PPP. |
| GPSEST | Menu > Processing > Parameter estimation | Ajuste por mínimos cuadrados de las observaciones. Genera un archivo residual para la revisión de datos basado en la combinación lineal libre de ionosfera (L3). Se escriben residuos normalizados, ya que se aplica la ponderación de las observaciones en función de la elevación. |
| RESRMS | Menu > Service > Residual files > Create residual statistics | Examina el archivo residual en busca de valores atípicos que superen un determinado umbral. |
| SATMRK | Menu > Service > Bernese observation files > Mark/delete observations | Se encarga de marcar valores atípicos identificados en los archivos de observación. Los datos de observación reales permanecen en los archivos, los registros correspondientes se marcan como malos. |

| | | |
|---------|--|---|
| GPSEST | Menu > Processing > Parameter estimation | Ajuste por mínimos cuadrados, pero con observaciones claras. Se genera archivos de resultados de: coordenadas de estaciones (extensión CRD) y correcciones de reloj de receptor (extensión CLK) |
| GPSEST | Menu > Processing > Parameter estimation | Ajuste por mínimos cuadrados de la red diaria y estimación de parámetros troposféricos. La estimación de coordenadas de estaciones tiene una restricción de ± 1 m dando como resultado una solución semilibre. Finalmente se genera los archivos de ecuaciones normales para cada día procesado en la semana. |
| ADDNEQ2 | Menu>Processing>Combi ne normal equation systems | El programa se encarga de combinar archivos de ecuaciones normales obtenidos de las soluciones del programa GPSEST. Se encarga de realizar una computación de una solución semanal combinada de coordenadas de estación teniendo en cuenta la información de varianza-covarianza. |

Transformación de ITRF

Una vez obtenidas las soluciones semanales de las 27 estaciones de la red REGME, se procede a transformar de ITRF2014 a ITRF2020 con el fin de compatibilizar y mantener actualizado la información geográfica de la red GNSS del Ecuador. Se realizó la transformación mediante el método de Semejanza o Conforme, también conocido como la

Transformación de Helmert. Este tipo de transformación para la transformación entre ITRF considera los siguientes parámetros: 3 parámetros de rotación, 3 parámetros de traslación y un diferencial de escala. Los parámetros se obtuvieron de la página web de la ITRF: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations>, y se pueden observar en la tabla a continuación.

Tabla 14

Parámetros de transformación de ITRF2014 a ITRF2020

| Parámetros | Traslación | | | Rotación | | | Diferencial de Escala |
|-----------------|------------|-----|------|----------|-------|-------|-----------------------|
| | T1 | T2 | T3 | R1 | R2 | R3 | D |
| Unidades | mm | mm | mm | .001" | .001" | .001" | ppb |
| Valor | 1,4 | 0,9 | -1,4 | 0 | 0 | 0 | 0,49 |

Capítulo IV: Resultados y Análisis

Resultados generales del procesamiento de soluciones semanales de la red de monitoreo continuo del Ecuador REGME

Para esta investigación se procesaron 4 meses o 18 semanas GPS comenzando con el primero de enero del 2022, el cual es un día de la semana 2190 hasta terminar con la semana 2207. Se procesaron un total de 120 días de 27 estaciones de monitoreo continuo de la REGME, y en la tabla 15 se representa la disponibilidad de datos que se recaudaron del 1 de enero al 30 de abril del año 2022 por estación.

Tabla 15

Número de días totales recopiladas por cada estación de la REGME

| Estación | Días totales recopilados | Porcentaje |
|-----------------|---------------------------------|-------------------|
| ABEC | 113 | 94,2% |
| ALEC | 110 | 91,7% |
| BHEC | 112 | 93,3% |
| CEEC | 112 | 93,3% |
| CHEC | 112 | 93,3% |
| CUEC | 112 | 93,3% |
| CXEC | 112 | 93,3% |
| EPEC | 112 | 93,3% |
| FOEC | 112 | 93,3% |
| GQEC | 112 | 93,3% |
| GZEC | 112 | 93,3% |
| ICEC | 112 | 93,3% |
| JNEC | 112 | 93,3% |
| LAEC | 112 | 93,3% |
| LJEC | 112 | 93,3% |
| MAEC | 112 | 93,3% |

| | | |
|------|-----|-------|
| MHEC | 112 | 93,3% |
| NJEC | 112 | 93,3% |
| PAEC | 112 | 93,3% |
| PLEC | 112 | 93,3% |
| PREC | 112 | 93,3% |
| QUI1 | 112 | 93,3% |
| RIOP | 118 | 98,3% |
| SEEC | 112 | 93,3% |
| SIEC | 111 | 92,5% |
| TPEC | 111 | 92,5% |
| TSEC | 109 | 90,8% |

Se recopilaron un total de 3024 archivos de observación RINEX desde la semana 2190 hasta la semana 2207, tomando en cuenta que ninguna estación cumplió con los 120 archivos por día que debería tener, ya sea porque el receptor estuvo en mantenimiento o se subió mal la información dentro del geoportal del IGM.

Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides finales de la estación EPEC

En la tabla 16 se representa las coordenadas cartesianas obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS de la estación EPEC, con las orbitas finales, en el software científico Bernese, donde son comparadas con las soluciones semanales que proporciona SIRGAS en su página oficial: (<https://sirgas.ipgh.org/>).

El resultado de la comparación es (ΔX , Δy & Δz), la diferencia entre las coordenadas cartesianas procesadas con orbitas finales, con las de SIRGAS. Para el estudio presente se establece una diferencia aceptable o error de ± 5 cm en los componentes horizontal y vertical (IGM, 2019). Otros autores imponen un límite de 1.5 cm y 3.0 cm en los componentes

planimétricos y altimétricos respectivamente al determinar coordenadas semanales.
(Zurutuza et al., 2012)

Tabla 16

Soluciones semanales procesadas con efemérides finales comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC

| Semana GPS | EPEC Efemérides Finales Procesadas | | | EPEC SIRGAS | | | Diferenciales | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | X(m) | Y(m) | Z(m) | X(m) | Y(m) | Z(m) | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| 2190 | 1277936,90387 | -6251278,06921 | -34832,36768 | 1277936,90394 | -6251278,07100 | -34832,36847 | 0,07 | 1,79 | 0,79 |
| 2191 | 1277936,90423 | -6251278,06659 | -34832,36536 | 1277936,90438 | -6251278,07476 | -34832,36683 | 0,15 | 8,17 | 1,47 |
| 2192 | 1277936,90485 | -6251278,06754 | -34832,36237 | 1277936,90307 | -6251278,07184 | -34832,36631 | 1,78 | 4,30 | 3,94 |
| 2193 | 1277936,90666 | -6251278,07379 | -34832,36258 | 1277936,90210 | -6251278,07009 | -34832,36702 | 4,56 | 3,70 | 4,44 |
| 2194 | 1277936,90304 | -6251278,07174 | -34832,36366 | 1277936,90396 | -6251278,07261 | -34832,36628 | 0,92 | 0,87 | 2,62 |
| 2195 | 1277936,89745 | -6251278,06883 | -34832,36612 | 1277936,90308 | -6251278,06990 | -34832,36702 | 5,63 | 1,07 | 0,90 |
| 2196 | 1277936,89336 | -6251278,07270 | -34832,36706 | 1277936,90367 | -6251278,07151 | -34832,36670 | 10,31 | 1,19 | 0,36 |
| 2197 | 1277936,89208 | -6251278,07568 | -34832,36957 | 1277936,90255 | -6251278,06966 | -34832,36680 | 10,47 | 6,02 | 2,77 |
| 2198 | 1277936,89261 | -6251278,06896 | -34832,36863 | 1277936,90343 | -6251278,07158 | -34832,36701 | 10,82 | 2,62 | 1,62 |
| 2199 | 1277936,89519 | -6251278,06680 | -34832,36916 | 1277936,90252 | -6251278,06692 | -34832,36759 | 7,33 | 0,12 | 1,57 |
| 2200 | 1277936,89603 | -6251278,06725 | -34832,36980 | 1277936,90320 | -6251278,06901 | -34832,36781 | 7,17 | 1,76 | 1,99 |

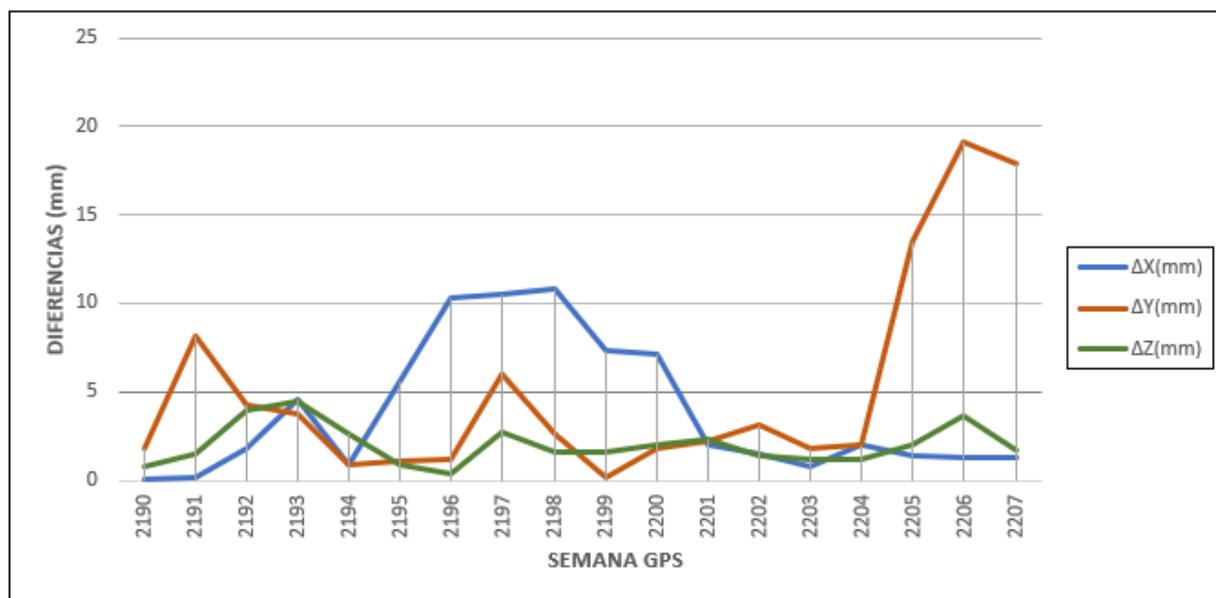
| | | | | | | | | | |
|------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|------|-------|------|
| 2201 | 1277936,90059 | -6251278,06693 | -34832,37096 | 1277936,90262 | -6251278,06471 | -34832,36860 | 2,03 | 2,22 | 2,36 |
| 2202 | 1277936,90519 | -6251278,06886 | -34832,36907 | 1277936,90373 | -6251278,06573 | -34832,36765 | 1,46 | 3,13 | 1,42 |
| 2203 | 1277936,90482 | -6251278,06355 | -34832,36887 | 1277936,90403 | -6251278,06533 | -34832,36769 | 0,79 | 1,78 | 1,18 |
| 2204 | 1277936,90048 | -6251278,06064 | -34832,36839 | 1277936,90245 | -6251278,06263 | -34832,36720 | 1,97 | 1,99 | 1,19 |
| 2205 | 1277936,90285 | -6251278,05544 | -34832,36868 | 1277936,90421 | -6251278,06893 | -34832,36665 | 1,36 | 13,49 | 2,03 |
| 2206 | 1277936,90242 | -6251278,04788 | -34832,37023 | 1277936,90373 | -6251278,06696 | -34832,36658 | 1,31 | 19,08 | 3,65 |
| 2207 | 1277936,90329 | -6251278,04876 | -34832,36856 | 1277936,90458 | -6251278,06664 | -34832,36688 | 1,29 | 17,88 | 1,68 |

Para las estaciones JNEC y LAEC, SIRGAS no conto con las soluciones semanales para ser compradas con las procesadas en Bernese, por esta razón fueron excluidas. Mientras que en el caso de PREC y TPEC, SIRGAS no contó con las soluciones semanales de la semana 2201 y 2202 respectivamente.

Las unidades de Δx , Δy & Δz están en milímetros, y se aprecia en las semanas 2206 y 2207 que alcanzan los valores más altos, sobre todo en la coordenada de altura (Δy), en la estación EPEC. Sin embargo, no supera el límite de tolerancia permitido, por lo que se acepta las soluciones semanales de la estación EPEC.

Figura 26

Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides finales comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC



Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas finales

En la tabla 17 se muestran los resultados de todas las estaciones de monitoreo continuo que se eligieron en esta investigación, para el análisis de la estadística descriptiva, se utilizó el máximo y mínimo valor, la media aritmética y la desviación estándar, tomando los

valores de la comparación de coordenadas (coordenadas cartesianas procesadas utilizando efemérides finales vs las soluciones semanales SIRGAS).

Tabla 17

Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides finales

| | ABEC | | | | ALEC | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 12,73 | 18,16 | 3,95 | Máximo | 11,66 | 38,34 | 5,77 |
| Mínimo | 1,19 | 0,19 | 0,30 | Mínimo | 0,07 | 1,53 | 0,11 |
| Media Aritmética | 5,02 | 5,30 | 1,88 | Media Aritmética | 4,37 | 12,90 | 2,06 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,85 | 5,42 | 1,07 | Desviación Estándar | 3,15 | 10,56 | 1,81 |
| | BHEC | | | | CEEC | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 8,88 | 21,75 | 4,83 | Máximo | 10,59 | 31,43 | 5,72 |
| Mínimo | 0,32 | 0,26 | 0,18 | Mínimo | 0,25 | 1,08 | 0,13 |
| Media Aritmética | 3,24 | 6,43 | 1,63 | Media Aritmética | 4,97 | 10,71 | 3,04 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 2,83 | 6,75 | 1,43 | Desviación Estándar | 3,29 | 8,13 | 1,65 |
| | CHEC | | | | CUEC | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 15,39 | 20,68 | 4,21 | Máximo | 14,89 | 17,93 | 5,09 |
| Mínimo | 0,45 | 0,58 | 0,83 | Mínimo | 0,14 | 1,09 | 0,60 |
| Media Aritmética | 5,08 | 5,40 | 2,14 | Media Aritmética | 4,93 | 5,92 | 2,44 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 5,06 | 6,08 | 1,04 | Desviación Estándar | 4,63 | 5,40 | 1,41 |
| | CXEC | | | | EPEC | | |

| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Máximo | 13,61 | 45,38 | 5,47 | Máximo | 10,82 | 19,08 | 4,44 |
| Mínimo | 0,27 | 0,21 | 0,49 | Mínimo | 0,07 | 0,12 | 0,36 |
| Media Aritmética | 4,29 | 13,64 | 2,56 | Media Aritmética | 3,86 | 5,07 | 2,00 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,38 | 12,50 | 1,37 | Desviación Estándar | 3,78 | 5,83 | 1,12 |
| FOEC | | | | GQEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 12,27 | 15,91 | 5,19 | Máximo | 6,26 | 17,52 | 4,81 |
| Mínimo | 0,64 | 0,38 | 0,11 | Mínimo | 0,51 | 0,30 | 0,75 |
| Media Aritmética | 3,75 | 5,04 | 1,96 | Media Aritmética | 3,43 | 7,35 | 2,86 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,51 | 4,35 | 1,48 | Desviación Estándar | 1,91 | 4,82 | 1,15 |
| GZEC | | | | ICEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 10,63 | 20,18 | 4,02 | Máximo | 10,19 | 23,26 | 5,27 |
| Mínimo | 0,67 | 0,47 | 0,07 | Mínimo | 0,70 | 1,77 | 0,09 |
| Media Aritmética | 4,04 | 6,34 | 2,00 | Media Aritmética | 3,98 | 8,12 | 1,91 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,00 | 5,42 | 1,06 | Desviación Estándar | 3,02 | 6,94 | 1,57 |
| LJEC | | | | MAEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 9,74 | 15,16 | 4,28 | Máximo | 12,63 | 23,24 | 4,58 |
| Mínimo | 0,06 | 1,23 | 0,26 | Mínimo | 0,07 | 0,44 | 0,05 |
| Media Aritmética | 3,15 | 6,34 | 2,22 | Media Aritmética | 4,62 | 6,24 | 2,24 |

| | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,12 | 3,66 | 1,16 | Desviación Estándar | 4,39 | 6,81 | 1,38 |
| MHEC | | | | NJEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 14,11 | 18,77 | 4,40 | Máximo | 9,96 | 21,41 | 3,86 |
| Mínimo | 0,41 | 0,17 | 0,39 | Mínimo | 0,11 | 0,24 | 1,14 |
| Media Aritmética | 5,21 | 5,04 | 1,88 | Media Aritmética | 3,35 | 6,27 | 2,43 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,92 | 5,49 | 1,30 | Desviación Estándar | 3,20 | 6,51 | 0,93 |
| PAEC | | | | PLEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 8,33 | 24,47 | 4,36 | Máximo | 31,04 | 39,99 | 20,10 |
| Mínimo | 0,62 | 0,93 | 0,35 | Mínimo | 0,24 | 1,20 | 0,13 |
| Media Aritmética | 3,30 | 7,62 | 2,03 | Media Aritmética | 12,21 | 14,85 | 8,81 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 2,42 | 7,15 | 1,26 | Desviación Estándar | 9,60 | 11,50 | 5,20 |
| PREC | | | | QUI1 | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 13,57 | 19,31 | 4,66 | Máximo | 11,40 | 23,01 | 4,77 |
| Mínimo | 0,04 | 0,40 | 0,47 | Mínimo | 0,75 | 0,15 | 0,17 |
| Media Aritmética | 3,98 | 5,71 | 2,39 | Media Aritmética | 4,34 | 5,60 | 2,02 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 3,89 | 6,00 | 1,16 | Desviación Estándar | 3,26 | 6,57 | 1,09 |
| RIOP | | | | SEEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 9,28 | 15,82 | 4,39 | Máximo | 6,33 | 22,26 | 4,06 |

| | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mínimo | 0,35 | 0,14 | 0,36 | Mínimo | 0,16 | 0,26 | 0,78 |
| Media Aritmética | 3,61 | 4,56 | 2,17 | Media Aritmética | 2,71 | 6,54 | 2,25 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 2,80 | 4,87 | 1,16 | Desviación Estándar | 1,76 | 6,56 | 1,06 |
| SIEC | | | | TPEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 8,02 | 19,00 | 5,41 | Máximo | 11,33 | 15,66 | 4,96 |
| Mínimo | 0,11 | 0,13 | 0,09 | Mínimo | 0,51 | 0,11 | 0,20 |
| Media Aritmética | 2,63 | 6,27 | 2,07 | Media Aritmética | 3,66 | 6,09 | 2,13 |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 2,58 | 5,22 | 1,40 | Desviación Estándar | 2,72 | 4,63 | 1,36 |
| TSEC | | | | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | | | |
| Máximo | 16,66 | 17,92 | 8,89 | | | | |
| Mínimo | 0,01 | 1,26 | 0,02 | | | | |
| Media Aritmética | 5,49 | 7,22 | 2,22 | | | | |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 5,26 | 5,13 | 2,26 | | | | |

Como se definió previamente el error medio no debe superar los 5 cm y este análisis es indicado mediante la media aritmética, dando los valores más altos las estaciones PLEC y ALEC, superando el centímetro en la coordenada Δy , pero manteniéndose en el límite de tolerancia.

Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides rápidas de la estación EPEC

En la tabla 18, se muestran los resultados de análisis de las coordenadas cartesianas obtenidas del procesamiento PPP, utilizando efemérides y órbitas rápidas, con las soluciones

semanales de SIRGAS de la estación EPEC. Esta comparación de soluciones permitió obtener los Δx , Δy & Δz y las posteriores medidas estadísticas.

Tabla 18

Soluciones semanales procesadas con efemérides rápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC

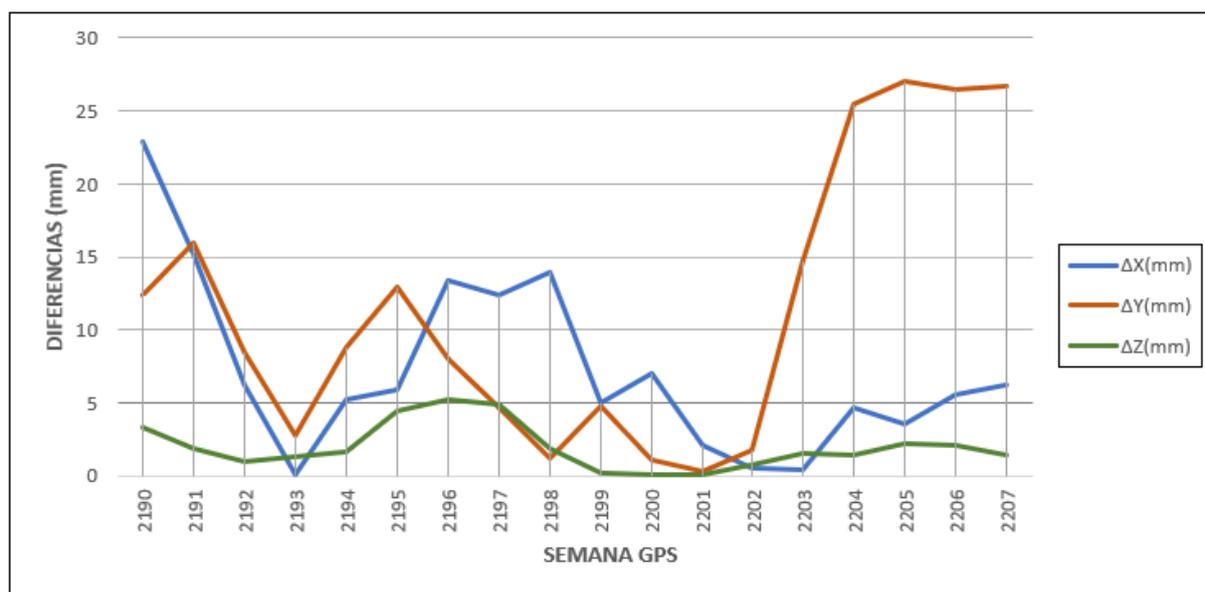
| Semana GPS | EPEC Efemérides Rápidas Procesadas | | | EPEC SIRGAS | | | Diferenciales | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | X(m) | Y(m) | Z(m) | X(m) | Y(m) | Z(m) | ΔX (mm) | ΔY (mm) | ΔZ (mm) |
| 2190 | 1277936,88108 | -6251278,05857 | -34832,37178 | 1277936,90394 | -6251278,07100 | -34832,36847 | 22,86 | 12,43 | 3,31 |
| 2191 | 1277936,88919 | -6251278,05883 | -34832,36866 | 1277936,90438 | -6251278,07476 | -34832,36683 | 15,19 | 15,93 | 1,83 |
| 2192 | 1277936,89687 | -6251278,06333 | -34832,36731 | 1277936,90307 | -6251278,07184 | -34832,36631 | 6,20 | 8,51 | 1,00 |
| 2193 | 1277936,90205 | -6251278,06738 | -34832,36838 | 1277936,90210 | -6251278,07009 | -34832,36702 | 0,05 | 2,71 | 1,36 |
| 2194 | 1277936,89873 | -6251278,08144 | -34832,36792 | 1277936,90396 | -6251278,07261 | -34832,36628 | 5,23 | 8,83 | 1,64 |
| 2195 | 1277936,89722 | -6251278,08287 | -34832,37144 | 1277936,90308 | -6251278,06990 | -34832,36702 | 5,86 | 12,97 | 4,42 |
| 2196 | 1277936,89034 | -6251278,07956 | -34832,37196 | 1277936,90367 | -6251278,07151 | -34832,36670 | 13,33 | 8,05 | 5,26 |
| 2197 | 1277936,89020 | -6251278,07434 | -34832,37173 | 1277936,90255 | -6251278,06966 | -34832,36680 | 12,35 | 4,68 | 4,93 |
| 2198 | 1277936,88954 | -6251278,07281 | -34832,36891 | 1277936,90343 | -6251278,07158 | -34832,36701 | 13,89 | 1,23 | 1,90 |
| 2199 | 1277936,89751 | -6251278,06215 | -34832,36779 | 1277936,90252 | -6251278,06692 | -34832,36759 | 5,01 | 4,77 | 0,20 |
| 2200 | 1277936,89618 | -6251278,07005 | -34832,36784 | 1277936,90320 | -6251278,06901 | -34832,36781 | 7,02 | 1,04 | 0,03 |

| | | | | | | | | | |
|------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|------|-------|------|
| 2201 | 1277936,90056 | -6251278,06502 | -34832,36866 | 1277936,90262 | -6251278,06471 | -34832,36860 | 2,06 | 0,31 | 0,06 |
| 2202 | 1277936,90422 | -6251278,06395 | -34832,36690 | 1277936,90373 | -6251278,06573 | -34832,36765 | 0,49 | 1,78 | 0,75 |
| 2203 | 1277936,90365 | -6251278,05060 | -34832,36618 | 1277936,90403 | -6251278,06533 | -34832,36769 | 0,38 | 14,73 | 1,51 |
| 2204 | 1277936,89782 | -6251278,03713 | -34832,36577 | 1277936,90245 | -6251278,06263 | -34832,36720 | 4,63 | 25,50 | 1,43 |
| 2205 | 1277936,90065 | -6251278,04193 | -34832,36445 | 1277936,90421 | -6251278,06893 | -34832,36665 | 3,56 | 27,00 | 2,20 |
| 2206 | 1277936,89815 | -6251278,04049 | -34832,36871 | 1277936,90373 | -6251278,06696 | -34832,36658 | 5,58 | 26,47 | 2,13 |
| 2207 | 1277936,89836 | -6251278,03995 | -34832,36829 | 1277936,90458 | -6251278,06664 | -34832,36688 | 6,22 | 26,69 | 1,41 |

Los resultados del procesamiento con efemérides rápidas de la estación EPEC, no varían significativamente al procesamiento con efemérides finales ya que los Δx , Δy & Δz , se encuentran en milímetros, en el rango de tolerancia de 5 cm. Existen también las semanas con los valores más altos, las cuales son 2205, 2206 y 2207 en la coordenada Δy , dando una diferencia de más de dos centímetros, pero no superando el valor de tolerancia, por lo que se acepta las soluciones semanales de la estación EPEC procesadas con orbitas rápidas.

Figura 27

Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides rápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC



Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas rápidas

En la tabla 19 muestra los resultados de todas las estaciones de monitoreo continuo de la REGME, escogidas para esta investigación, de igual manera se utilizó los valores máximos y mínimos, media aritmética y la desviación estándar, para el análisis estadístico, los valores utilizados son los resultados de la diferencia de las coordenadas (coordenadas procesadas con orbitas rápidas vs las soluciones semanales de SIRGAS).

Tabla 19

Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides rápidas

| ABEC | | | | ALEC | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 30,36 | 28,38 | 5,29 | Máximo | 25,44 | 55,07 | 6,92 |
| Mínimo | 0,41 | 0,42 | 0,10 | Mínimo | 0,37 | 0,23 | 0,00 |
| Media Aritmética | 6,83 | 12,52 | 2,05 | Media Aritmética | 7,00 | 25,52 | 1,74 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 7,10 | 9,41 | 1,73 | Estándar | 6,57 | 15,53 | 1,68 |
| BHEC | | | | CEEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 21,37 | 31,79 | 4,64 | Máximo | 23,56 | 41,55 | 6,17 |
| Mínimo | 0,11 | 0,88 | 0,12 | Mínimo | 1,66 | 1,56 | 0,27 |
| Media Aritmética | 5,09 | 13,35 | 1,92 | Media Aritmética | 9,81 | 18,93 | 2,89 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 5,58 | 9,53 | 1,32 | Estándar | 7,48 | 11,78 | 1,78 |
| CHEC | | | | CUEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 36,18 | 33,38 | 4,59 | Máximo | 28,20 | 30,54 | 4,12 |
| Mínimo | 0,33 | 2,58 | 0,09 | Mínimo | 0,44 | 0,14 | 0,24 |
| Media Aritmética | 7,98 | 13,88 | 2,42 | Media Aritmética | 8,76 | 12,58 | 1,97 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 8,30 | 11,07 | 1,64 | Estándar | 6,65 | 10,00 | 1,10 |
| CXEC | | | | EPEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 364,65 | 233,99 | 41,27 | Máximo | 22,86 | 27,00 | 5,26 |

| | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mínimo | 0,09 | 1,03 | 0,32 | Mínimo | 0,05 | 0,31 | 0,03 |
| Media Aritmética | 48,39 | 42,54 | 9,25 | Media Aritmética | 7,22 | 11,31 | 1,96 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 88,88 | 56,84 | 9,68 | Estándar | 6,05 | 9,56 | 1,57 |
| FOEC | | | | GQEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 20,82 | 22,03 | 5,73 | Máximo | 28,48 | 38,06 | 7,27 |
| Mínimo | 0,36 | 0,94 | 0,03 | Mínimo | 0,94 | 1,60 | 0,38 |
| Media Aritmética | 6,45 | 11,35 | 1,94 | Media Aritmética | 7,12 | 16,13 | 3,18 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 5,94 | 7,57 | 1,44 | Estándar | 6,98 | 11,84 | 1,95 |
| GZEC | | | | ICEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 24,77 | 29,69 | 7,16 | Máximo | 18,26 | 29,41 | 4,96 |
| Mínimo | 0,53 | 0,47 | 0,38 | Mínimo | 1,21 | 1,01 | 0,07 |
| Media Aritmética | 7,50 | 12,82 | 2,96 | Media Aritmética | 6,73 | 16,22 | 1,78 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 7,11 | 8,64 | 2,12 | Estándar | 3,92 | 10,01 | 1,51 |
| LJEC | | | | MAEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 20,54 | 20,84 | 5,38 | Máximo | 30,48 | 34,80 | 5,35 |
| Mínimo | 0,98 | 0,54 | 0,14 | Mínimo | 2,00 | 0,04 | 0,04 |
| Media Aritmética | 5,10 | 11,49 | 2,22 | Media Aritmética | 9,37 | 13,77 | 2,33 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 5,08 | 6,12 | 1,59 | Estándar | 6,62 | 12,30 | 1,51 |
| MHEC | | | | NJEC | | | |

| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Máximo | 26,92 | 24,47 | 4,02 | Máximo | 23,09 | 32,88 | 5,53 |
| Mínimo | 0,85 | 0,51 | 0,09 | Mínimo | 0,25 | 0,97 | 0,20 |
| Media Aritmética | 7,49 | 11,49 | 1,74 | Media Aritmética | 6,29 | 13,55 | 2,19 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 6,43 | 8,71 | 1,19 | Estándar | 6,30 | 10,36 | 1,55 |
| PAEC | | | | PLEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 26,22 | 35,60 | 6,33 | Máximo | 1304,58 | 1161,15 | 297,17 |
| Mínimo | 0,28 | 1,01 | 0,14 | Mínimo | 10,15 | 8,46 | 1,22 |
| Media Aritmética | 5,99 | 17,19 | 2,17 | Media Aritmética | 519,18 | 535,81 | 130,30 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 5,89 | 10,01 | 1,77 | Estándar | 433,77 | 331,51 | 103,23 |
| PREC | | | | QUI1 | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 19,09 | 30,29 | 5,15 | Máximo | 21,92 | 33,36 | 4,75 |
| Mínimo | 0,52 | 0,67 | 0,20 | Mínimo | 0,52 | 0,73 | 0,16 |
| Media Aritmética | 6,27 | 12,85 | 2,37 | Media Aritmética | 6,66 | 12,14 | 1,90 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 5,40 | 10,24 | 1,42 | Estándar | 5,70 | 11,49 | 1,16 |
| RIOP | | | | SEEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 11,15 | 22,66 | 6,78 | Máximo | 22,79 | 33,47 | 6,66 |
| Mínimo | 0,09 | 0,41 | 0,04 | Mínimo | 0,06 | 0,85 | 0,28 |
| Media Aritmética | 4,18 | 10,27 | 2,66 | Media Aritmética | 6,37 | 16,06 | 2,55 |

| Desviación | | | Desviación | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Estándar | 3,93 | 7,05 | 2,11 | Estándar | 6,21 | 11,76 | 1,88 |
| SIEC | | | TPEC | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 20,28 | 28,82 | 5,24 | Máximo | 15,63 | 37,74 | 6,63 |
| Mínimo | 0,35 | 1,18 | 0,14 | Mínimo | 0,05 | 2,25 | 0,23 |
| Media Aritmética | 5,19 | 12,20 | 2,47 | Media Aritmética | 6,07 | 15,70 | 2,36 |
| Desviación | | | Desviación | | | | |
| Estándar | 5,04 | 9,17 | 1,63 | Estándar | 4,56 | 11,86 | 1,94 |
| TSEC | | | | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | | | |
| Máximo | 984,76 | 666,86 | 160,75 | | | | |
| Mínimo | 0,34 | 2,00 | 0,33 | | | | |
| Media Aritmética | 108,27 | 75,51 | 18,40 | | | | |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 284,70 | 176,53 | 45,87 | | | | |

En esta ocasión las estaciones PLEC y TSEC, no cumplen con el rango de tolerancia que es de 5 cm de RMS, y en el caso de PLEC sobrepasa los 10 cm en las tres coordenadas (Δx , Δy & Δz) al igual que la estación TSEC no cumple en la coordenada Δx & Δy . Las soluciones en general descartando las estaciones anteriormente mencionadas, los valores de la diferencia han aumentado en comparación con los anteriores resultados, sin embargo, cumplen con el límite de tolerancia.

Análisis de las coordenadas obtenidas del software Bernese con las efemérides ultrarrápidas de la estación EPEC

En la tabla 20, se observa los resultados de análisis de las coordenadas cartesianas obtenidas del procesamiento PPP, utilizando efemérides y órbitas ultrarrápidas, con las realizaciones semanales procesadas por SIRGAS de la estación EPEC. De igual manera se obtuvo Δx , Δy & Δz .

Tabla 20

Soluciones semanales procesadas con efemérides ultrarrápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC

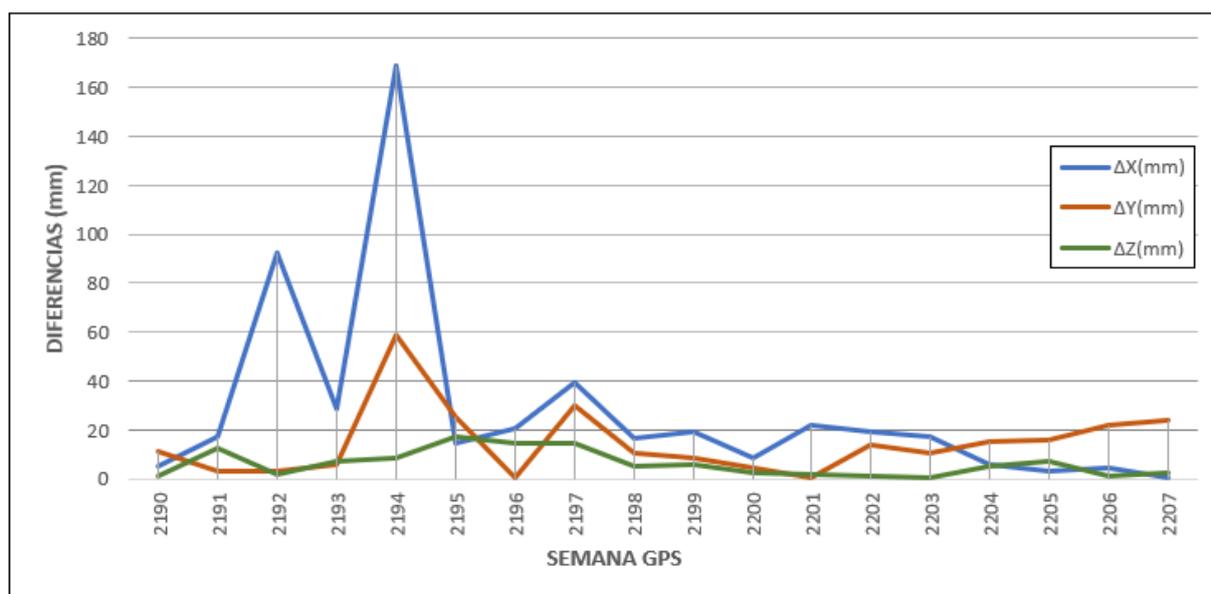
| Semana GPS | EPEC Efemérides Ultrarrápidas Procesadas | | | EPEC SIRGAS | | | Diferenciales | | |
|---------------|--|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | X(m) | Y(m) | Z(m) | X(m) | Y(m) | Z(m) | ΔX (mm) | ΔY (mm) | ΔZ (mm) |
| 2190 | 1277936,90918 | -6251278,08198 | -34832,36953 | 1277936,90394 | -6251278,07100 | -34832,36847 | 5,24 | 10,98 | 1,06 |
| 2191 | 1277936,88707 | -6251278,07126 | -34832,37966 | 1277936,90438 | -6251278,07476 | -34832,36683 | 17,31 | 3,50 | 12,83 |
| 2192 | 1277936,81069 | -6251278,06852 | -34832,36470 | 1277936,90307 | -6251278,07184 | -34832,36631 | 92,38 | 3,32 | 1,61 |
| 2193 | 1277936,87339 | -6251278,07604 | -34832,37414 | 1277936,90210 | -6251278,07009 | -34832,36702 | 28,71 | 5,95 | 7,12 |
| 2194 | 1277937,07287 | -6251278,01344 | -34832,37506 | 1277936,90396 | -6251278,07261 | -34832,36628 | 168,91 | 59,17 | 8,78 |
| 2195 | 1277936,88881 | -6251278,09514 | -34832,38396 | 1277936,90308 | -6251278,06990 | -34832,36702 | 14,27 | 25,24 | 16,94 |
| 2196 | 1277936,88312 | -6251278,07202 | -34832,38161 | 1277936,90367 | -6251278,07151 | -34832,36670 | 20,55 | 0,51 | 14,91 |
| 2197 | 1277936,86341 | -6251278,09968 | -34832,38170 | 1277936,90255 | -6251278,06966 | -34832,36680 | 39,14 | 30,02 | 14,90 |
| 2198 | 1277936,88659 | -6251278,08215 | -34832,37209 | 1277936,90343 | -6251278,07158 | -34832,36701 | 16,84 | 10,57 | 5,08 |
| 2199 | 1277936,92200 | -6251278,05844 | -34832,37342 | 1277936,90252 | -6251278,06692 | -34832,36759 | 19,48 | 8,48 | 5,83 |
| 2200 | 1277936,91173 | -6251278,07384 | -34832,37000 | 1277936,90320 | -6251278,06901 | -34832,36781 | 8,53 | 4,83 | 2,19 |

| | | | | | | | | | |
|------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-------|-------|------|
| 2201 | 1277936,92465 | -6251278,06520 | -34832,36682 | 1277936,90262 | -6251278,06471 | -34832,36860 | 22,03 | 0,49 | 1,78 |
| 2202 | 1277936,92320 | -6251278,07944 | -34832,36894 | 1277936,90373 | -6251278,06573 | -34832,36765 | 19,47 | 13,71 | 1,29 |
| 2203 | 1277936,92124 | -6251278,05480 | -34832,36714 | 1277936,90403 | -6251278,06533 | -34832,36769 | 17,21 | 10,53 | 0,55 |
| 2204 | 1277936,90800 | -6251278,04714 | -34832,36190 | 1277936,90245 | -6251278,06263 | -34832,36720 | 5,55 | 15,49 | 5,30 |
| 2205 | 1277936,90740 | -6251278,05307 | -34832,35933 | 1277936,90421 | -6251278,06893 | -34832,36665 | 3,19 | 15,86 | 7,32 |
| 2206 | 1277936,90798 | -6251278,04523 | -34832,36509 | 1277936,90373 | -6251278,06696 | -34832,36658 | 4,25 | 21,73 | 1,49 |
| 2207 | 1277936,90518 | -6251278,04297 | -34832,36408 | 1277936,90458 | -6251278,06664 | -34832,36688 | 0,60 | 23,67 | 2,80 |

A diferencia de los anteriores resultados, el procesamiento con efemérides ultrarrápidas varía de manera considerable. En todas las semanas, excepto por la semana 2200, se observa que la diferencia supera el cm, e incluso puede llegar a obtener valores que exceden los 5 cm de umbral como se observa en las semanas 2192 y 2194.

Figura 28

Gráfico de líneas de Δx , Δy & Δz de la comparación entre las soluciones semanales procesadas con efemérides ultrarrápidas comparadas con la realización SIRGAS de la estación EPEC



Resumen de estadística descriptiva de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME utilizando efemérides/órbitas ultrarrápidas

En la tabla 21 se muestra el análisis de estadística descriptiva de todas las estaciones de monitoreo continuo que se eligieron en la investigación. Para el análisis, se utilizó el máximo y mínimo valor, la media aritmética y la desviación estándar, tomando los valores de la comparación de coordenadas (coordenadas cartesianas procesadas utilizando efemérides ultrarrápidas vs las soluciones semanales SIRGAS).

Tabla 21

Resumen estadístico de todas las estaciones procesadas utilizando efemérides ultrarrápidas

| ABEC | | | | ALEC | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 171,31 | 44,56 | 22,81 | Máximo | 262,67 | 61,67 | 55,21 |
| Mínimo | 1,44 | 0,52 | 1,69 | Mínimo | 0,69 | 7,26 | 1,47 |
| Media Aritmética | 27,37 | 14,01 | 8,60 | Media Aritmética | 53,11 | 32,06 | 13,05 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 40,55 | 12,97 | 6,55 | Estándar | 63,12 | 15,73 | 12,42 |
| BHEC | | | | CEEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 79,49 | 45,61 | 24,76 | Máximo | 174,48 | 47,25 | 28,06 |
| Mínimo | 1,01 | 1,43 | 0,31 | Mínimo | 1,85 | 2,61 | 0,68 |
| Media Aritmética | 24,33 | 14,23 | 8,85 | Media Aritmética | 47,34 | 18,65 | 9,83 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 22,73 | 11,05 | 7,79 | Estándar | 44,57 | 13,69 | 7,81 |
| CHEC | | | | CUEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 269,27 | 48,44 | 17,93 | Máximo | 144,60 | 39,94 | 15,25 |
| Mínimo | 1,30 | 0,19 | 0,42 | Mínimo | 0,22 | 0,09 | 0,51 |
| Media Aritmética | 42,23 | 16,98 | 7,79 | Media Aritmética | 22,78 | 12,74 | 6,53 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 63,80 | 12,62 | 5,52 | Estándar | 33,26 | 11,52 | 5,13 |
| CXEC | | | | EPEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 663,44 | 173,74 | 149,07 | Máximo | 168,91 | 59,17 | 16,94 |
| Mínimo | 8,78 | 1,40 | 2,93 | Mínimo | 0,60 | 0,49 | 0,55 |
| Media Aritmética | 152,99 | 49,69 | 35,88 | Media Aritmética | 27,98 | 14,67 | 6,21 |

| Desviación | | | Desviación | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Estándar | 187,78 | 52,71 | 41,46 | Estándar | 40,76 | 14,09 | 5,39 |
| FOEC | | | GQEC | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 64,95 | 35,48 | 18,12 | Máximo | 58,97 | 99,19 | 25,97 |
| Mínimo | 2,46 | 0,33 | 0,22 | Mínimo | 1,42 | 0,37 | 1,03 |
| Media Aritmética | 26,27 | 10,07 | 7,88 | Media Aritmética | 25,49 | 19,07 | 9,09 |
| Desviación | | | Desviación | | | | |
| Estándar | 19,77 | 8,31 | 5,11 | Estándar | 18,84 | 23,21 | 6,89 |
| GZEC | | | ICEC | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 144,13 | 63,49 | 21,22 | Máximo | 19,25 | 37,55 | 18,63 |
| Mínimo | 0,37 | 0,20 | 0,89 | Mínimo | 1,08 | 0,27 | 0,12 |
| Media Aritmética | 30,25 | 17,71 | 9,16 | Media Aritmética | 7,13 | 13,54 | 6,55 |
| Desviación | | | Desviación | | | | |
| Estándar | 33,79 | 19,30 | 5,90 | Estándar | 5,48 | 10,07 | 5,28 |
| LJEC | | | MAEC | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 192,74 | 33,43 | 33,78 | Máximo | 176,35 | 79,20 | 17,32 |
| Mínimo | 0,60 | 1,32 | 1,22 | Mínimo | 0,14 | 0,62 | 0,26 |
| Media Aritmética | 39,55 | 14,98 | 9,27 | Media Aritmética | 30,56 | 17,39 | 6,61 |
| Desviación | | | Desviación | | | | |
| Estándar | 58,42 | 8,90 | 7,99 | Estándar | 45,86 | 18,50 | 5,58 |
| MHEC | | | NJEC | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 1256,21 | 287,36 | 87,10 | Máximo | 66,31 | 31,02 | 20,94 |

| | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mínimo | 1,81 | 4,33 | 0,27 | Mínimo | 1,73 | 1,36 | 0,13 |
| Media Aritmética | 98,45 | 34,24 | 14,37 | Media Aritmética | 19,18 | 13,13 | 7,59 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 292,38 | 64,77 | 19,65 | Estándar | 17,08 | 9,44 | 5,77 |
| PAEC | | | | PLEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 458,86 | 193,22 | 23,97 | Máximo | 1716,97 | 2245,52 | 356,75 |
| Mínimo | 0,10 | 0,66 | 0,06 | Mínimo | 34,41 | 107,70 | 17,82 |
| Media Aritmética | 59,51 | 32,70 | 8,46 | Media Aritmética | 548,36 | 503,03 | 144,75 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 119,32 | 56,14 | 8,39 | Estándar | 453,87 | 527,73 | 110,77 |
| PREC | | | | QUI1 | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 82,78 | 52,53 | 15,55 | Máximo | 44,37 | 24,81 | 17,28 |
| Mínimo | 0,71 | 0,32 | 0,33 | Mínimo | 0,87 | 0,83 | 0,89 |
| Media Aritmética | 24,16 | 14,91 | 7,69 | Media Aritmética | 19,15 | 10,74 | 6,85 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 26,64 | 12,28 | 5,20 | Estándar | 15,99 | 7,77 | 5,23 |
| RIOP | | | | SEEC | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
| Máximo | 140,31 | 39,58 | 19,26 | Máximo | 214,00 | 31,71 | 21,65 |
| Mínimo | 1,22 | 0,28 | 0,88 | Mínimo | 1,37 | 0,26 | 1,45 |
| Media Aritmética | 20,31 | 11,65 | 8,84 | Media Aritmética | 29,65 | 13,63 | 7,89 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 30,74 | 9,90 | 6,32 | Estándar | 50,47 | 8,60 | 5,60 |
| SIEC | | | | TPEC | | | |

| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Máximo | 310,02 | 84,39 | 32,95 | Máximo | 192,86 | 153,13 | 29,85 |
| Mínimo | 3,00 | 0,45 | 0,10 | Mínimo | 2,23 | 0,89 | 7,04 |
| Media Aritmética | 52,49 | 22,55 | 8,71 | Media Aritmética | 73,74 | 54,06 | 14,37 |
| Desviación | | | | Desviación | | | |
| Estándar | 77,84 | 20,90 | 7,37 | Estándar | 51,61 | 41,05 | 6,97 |
| TSEC | | | | | | | |
| | $\Delta X(\text{mm})$ | $\Delta Y(\text{mm})$ | $\Delta Z(\text{mm})$ | | | | |
| Máximo | 1463,82 | 551,73 | 121,95 | | | | |
| Mínimo | 0,61 | 1,39 | 0,40 | | | | |
| Media Aritmética | 166,61 | 82,90 | 18,93 | | | | |
| Desviación | | | | | | | |
| Estándar | 353,31 | 144,61 | 29,53 | | | | |

Al igual que en el anterior análisis se observa que las diferencias entre soluciones semanales varían significativamente, obteniendo valores máximos que superan el metro como es el caso de las estaciones MHEC, PLEC y TSEC. En cuanto a error medio, 8 estaciones sobrepasan el umbral de 5 cm en cualquiera de sus coordenadas, mientras que las demás se mantienen dentro de ese límite.

Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de órbita final en el software Bernese

Tabla 22

RMSE de los componentes horizontal (Este y Norte) y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides finales

| Nº | Estación | RMSE Horizontal | RMSE Up |
|----|----------|-----------------|---------|
| 1 | ABEC | 6,698 | 7,402 |
| 2 | ALEC | 6,734 | 16,196 |

| | | | |
|---------------------|------|--------|--------|
| 3 | BHEC | 4,835 | 9,147 |
| 4 | CEEC | 7,541 | 12,923 |
| 5 | CHEC | 7,527 | 7,940 |
| 6 | CUEC | 7,403 | 7,763 |
| 7 | CXEC | 6,639 | 18,087 |
| 8 | EPEC | 5,800 | 7,592 |
| 9 | FOEC | 5,762 | 6,452 |
| 10 | GQEC | 5,485 | 8,401 |
| 11 | GZEC | 5,856 | 7,970 |
| 12 | ICEC | 5,505 | 10,629 |
| 13 | LJEC | 5,562 | 6,866 |
| 14 | MAEC | 6,763 | 9,129 |
| 15 | MHEC | 6,879 | 7,303 |
| 16 | NJEC | 5,229 | 8,918 |
| 17 | PAEC | 4,527 | 10,390 |
| 18 | PLEC | 17,701 | 19,249 |
| 19 | PREC | 5,910 | 8,286 |
| 20 | QUI1 | 5,596 | 8,656 |
| 21 | RIOP | 5,336 | 6,413 |
| 22 | SEEC | 4,033 | 9,138 |
| 23 | SIEC | 4,720 | 7,882 |
| 24 | TPEC | 5,860 | 7,033 |
| 25 | TSEC | 8,731 | 8,177 |
| Valor Medio | | 6,505 | 9,518 |
| Desviación estándar | | 2,570 | 3,466 |

Tabla 23

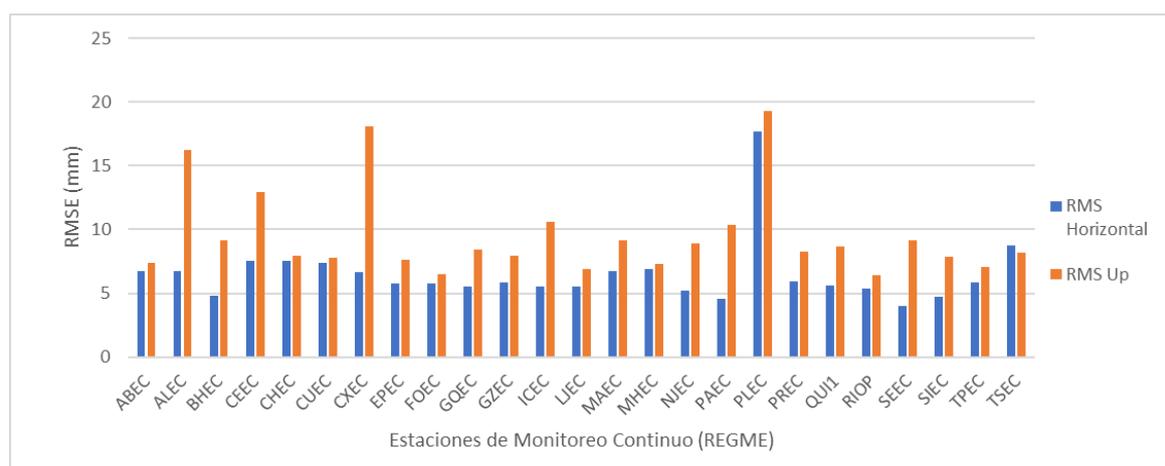
Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides finales

| Nº | Estación | Este Desviación Estándar (mm) | Norte Desviación Estándar (mm) | Up Desviación Estándar (mm) |
|----|----------|--|---|--------------------------------------|
| 1 | ABEC | 4,870 | 2,239 | 6,899 |
| 2 | ALEC | 8,523 | 2,487 | 28,722 |
| 3 | BHEC | 4,322 | 2,227 | 7,869 |
| 4 | CEEC | 4,400 | 3,319 | 12,922 |
| 5 | CHEC | 5,977 | 2,385 | 7,060 |
| 6 | CUEC | 5,633 | 2,851 | 7,174 |
| 7 | CXEC | 6,060 | 2,721 | 18,530 |
| 8 | EPEC | 4,998 | 2,313 | 6,780 |
| 9 | FOEC | 4,710 | 2,500 | 6,415 |
| 10 | GQEC | 3,256 | 3,047 | 8,559 |
| 11 | GZEC | 4,560 | 2,343 | 8,047 |

| | | | | |
|--------|------|--------|--------|--------|
| 12 | ICEC | 5,043 | 2,516 | 10,271 |
| 13 | LJEC | 4,765 | 2,574 | 6,948 |
| 14 | MAEC | 5,337 | 2,708 | 7,150 |
| 15 | MHEC | 5,020 | 2,481 | 6,810 |
| 16 | NJEC | 4,362 | 2,523 | 7,269 |
| 17 | PAEC | 3,937 | 2,356 | 7,411 |
| 18 | PLEC | 12,472 | 10,694 | 19,417 |
| 19 | PREC | 4,749 | 2,732 | 6,744 |
| 20 | QUI1 | 4,510 | 2,322 | 7,174 |
| 21 | RIOP | 4,663 | 2,488 | 6,385 |
| 22 | SEEC | 3,116 | 2,559 | 8,883 |
| 23 | SIEC | 4,050 | 2,515 | 7,873 |
| 24 | TPEC | 5,439 | 2,254 | 7,204 |
| 25 | TSEC | 6,451 | 3,071 | 8,370 |
| Media | | 5,249 | 2,889 | 9,475 |
| Máximo | | 12,472 | 10,694 | 28,722 |
| Mínimo | | 3,116 | 2,227 | 6,385 |

Figura 29

Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides finales)



En la tabla 22 se presenta los RMSE de los componentes planimétricos y altimétricos de la comparación entre soluciones procesadas utilizando efemérides finales y las soluciones SIRGAS en sistema de coordenadas topocéntricas (ENU). Se observa que, para las 25 estaciones procesadas, sus RMS están dentro del rango escogido para el proyecto y además en el análisis se calculó la desviación típica para cada estación, que ofrece información sobre

la dispersión media de las coordenadas en Norte, Este y Up (Altura), que se muestra en la tabla 23.

En la Figura 29, se muestran los RMS de las soluciones procesadas con efemérides finales entre las soluciones semanales SIRGAS, observándose que en la estación PLEC tiene una mayor diferencia en Este, Norte y Altura sobrepasando el centímetro. Pero a partir de un análisis general la media de RMSE no sobrepasan los 5 cm que se pusieron como límite para esta investigación, también cumpliendo con la precisión que se espera al trabajar con orbitas finales que es de 2,5 cm.

Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de orbita rápida en el software Bernese

Tabla 24

RMSE de los componentes horizontal y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides rápidas

| N° | Estación | RMSE Horizontal | RMSE Up |
|----|----------|-----------------|---------|
| 1 | ABEC | 9,435 | 15,892 |
| 2 | ALEC | 9,547 | 29,719 |
| 3 | BHEC | 7,831 | 16,225 |
| 4 | CEEC | 13,696 | 21,500 |
| 5 | CHEC | 10,380 | 18,371 |
| 6 | CUEC | 10,592 | 16,252 |
| 7 | CXEC | 108,411 | 55,541 |
| 8 | EPEC | 8,944 | 15,073 |
| 9 | FOEC | 9,478 | 13,188 |
| 10 | GQEC | 10,588 | 19,806 |
| 11 | GZEC | 11,131 | 15,091 |
| 12 | ICEC | 7,991 | 18,944 |
| 13 | LJEC | 8,248 | 12,531 |
| 14 | MAEC | 10,383 | 19,017 |
| 15 | MHEC | 9,583 | 14,530 |
| 16 | NJEC | 9,232 | 16,849 |
| 17 | PAEC | 8,029 | 20,047 |
| 18 | PLEC | 662,702 | 623,135 |
| 19 | PREC | 9,407 | 15,795 |
| 20 | QUI1 | 8,267 | 16,842 |
| 21 | RIOP | 7,407 | 11,865 |
| 22 | SEEC | 9,585 | 19,578 |

| | | | |
|---------------------|------|---------|---------|
| 23 | SIEC | 7,832 | 15,054 |
| 24 | TPEC | 7,249 | 19,794 |
| 25 | TSEC | 256,647 | 244,678 |
| Valor Medio | | 49,304 | 52,213 |
| Desviación estándar | | 138,139 | 127,480 |

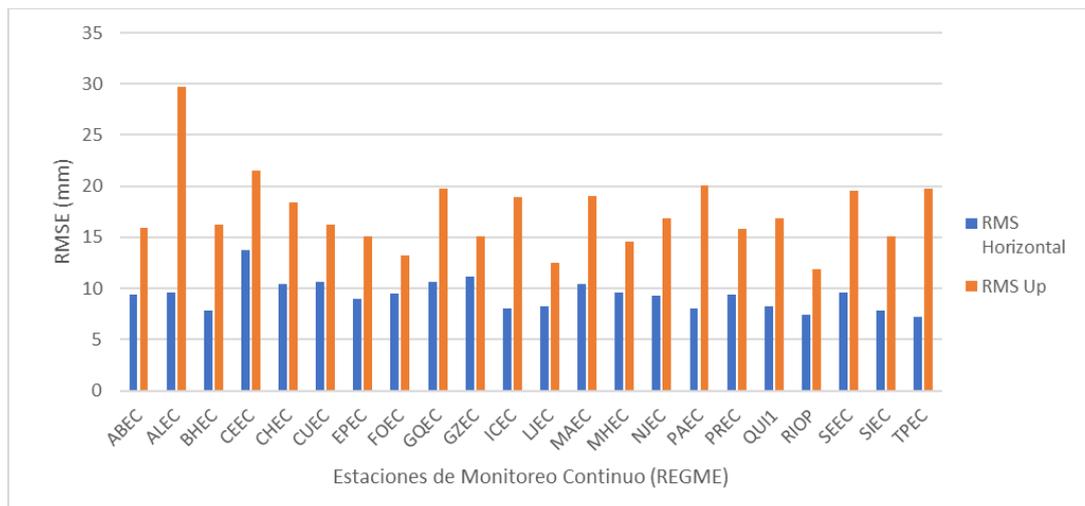
Tabla 25

Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides rápidas

| N° | Estación | Este Desviación Estándar (mm) | Norte Desviación Estándar (mm) | Up Desviación Estándar (mm) |
|----|----------|--|---|--------------------------------------|
| 1 | ABEC | 7,532 | 1,846 | 14,153 |
| 2 | ALEC | 8,523 | 2,487 | 28,722 |
| 3 | BHEC | 7,027 | 2,093 | 15,197 |
| 4 | CEEC | 12,119 | 2,603 | 21,414 |
| 5 | CHEC | 8,593 | 2,181 | 14,665 |
| 6 | CUEC | 7,397 | 1,825 | 14,934 |
| 7 | CXEC | 105,026 | 12,950 | 53,645 |
| 8 | EPEC | 6,724 | 2,142 | 12,829 |
| 9 | FOEC | 7,599 | 2,293 | 12,914 |
| 10 | GQEC | 8,182 | 2,704 | 19,836 |
| 11 | GZEC | 8,674 | 2,352 | 15,166 |
| 12 | ICEC | 5,648 | 1,971 | 19,481 |
| 13 | LJEC | 7,701 | 1,977 | 12,797 |
| 14 | MAEC | 6,958 | 2,154 | 16,435 |
| 15 | MHEC | 7,005 | 1,546 | 13,266 |
| 16 | NJEC | 7,705 | 1,693 | 15,330 |
| 17 | PAEC | 7,059 | 2,458 | 17,690 |
| 18 | PLEC | 654,967 | 161,945 | 615,257 |
| 19 | PREC | 8,108 | 2,089 | 15,054 |
| 20 | QUI1 | 6,684 | 2,040 | 13,621 |
| 21 | RIOP | 6,100 | 2,091 | 12,024 |
| 22 | SEEC | 7,823 | 2,471 | 19,322 |
| 23 | SIEC | 6,741 | 2,227 | 14,755 |
| 24 | TPEC | 6,710 | 2,372 | 19,087 |
| 25 | TSEC | 245,790 | 56,523 | 239,797 |
| | Media | 46,896 | 11,161 | 50,696 |
| | Máximo | 654,967 | 161,945 | 615,257 |
| | Mínimo | 5,648 | 1,546 | 12,024 |

Figura 30

Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides rápidas)



En la tabla 24, también se muestra los RMSE de los componentes planimétricos y altimétricos de la comparación entre soluciones procesadas utilizando efemérides rápidas y las soluciones SIRGAS en sistema de coordenadas topocéntricas (ENU). Se obtuvieron las desviaciones típicas de cada estación, y se observa que las estaciones PLEC, TSEC y CXEC son las que sobrepasan el límite establecido, obteniéndose valores que superan los 600 mm, pero si se omiten dichas estaciones, las precisiones de las otras estaciones cumplen con el rango esperado, cuestionando que los insumos de las estaciones PLEC, TSEC y CXEC, son buenos para el procesamiento.

La figura 30, es una representación gráfica de la tabla 24, donde se excluyó las estaciones PLEC, TSEC y CXEC, debido a la diferencia exagerada que dio como resultado y para que se pueda visualizar de mejor manera las 22 estaciones restantes, dando como valor máximo en la coordenada Este la estación CEEC con 12,119 mm, en la coordenada Norte un máximo de 2,704 mm en la estación GQEC y para la Altitud un valor máximo de 28,722 en la estación ALEC, en general 22 de las 25 estaciones cumplen con el límite expuesto para esta investigación que es de 5 cm.

Coordenadas ENU comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento con archivos de orbita ultrarrápida en el software Bernese

Tabla 26

RMSE de los componentes horizontal y vertical de las soluciones semanales utilizando efemérides ultrarrápidas

| Nº | Estación | RMSE Horizontal | RMSE Up |
|----|---------------------|-----------------|---------|
| 1 | ABEC | 51,097 | 12,665 |
| 2 | ALEC | 83,086 | 35,462 |
| 3 | BHEC | 35,085 | 17,386 |
| 4 | CEEC | 65,171 | 23,429 |
| 5 | CHEC | 72,785 | 29,302 |
| 6 | CUEC | 41,777 | 13,177 |
| 7 | CXEC | 242,828 | 75,829 |
| 8 | EPEC | 50,941 | 15,016 |
| 9 | FOEC | 34,156 | 12,079 |
| 10 | GQEC | 35,228 | 27,274 |
| 11 | GZEC | 45,759 | 26,111 |
| 12 | ICEC | 12,242 | 16,664 |
| 13 | LJEC | 69,891 | 18,658 |
| 14 | MAEC | 56,121 | 21,658 |
| 15 | MHEC | 308,805 | 27,815 |
| 16 | NJEC | 27,353 | 15,512 |
| 17 | PAEC | 139,277 | 42,117 |
| 18 | PLEC | 757,576 | 9 |
| 19 | PREC | 36,947 | 18,327 |
| 20 | QUI1 | 26,424 | 12,453 |
| 21 | RIOP | 38,964 | 11,457 |
| 22 | SEEC | 56,973 | 19,658 |
| 23 | SIEC | 89,829 | 38,157 |
| 24 | TPEC | 95,942 | 59,157 |
| 25 | TSEC | 374,046 | 183,15 |
| | Media | 113,932 | 57,535 |
| | | | 131,47 |
| | Desviación estándar | 161,401 | 2 |

Tabla 27

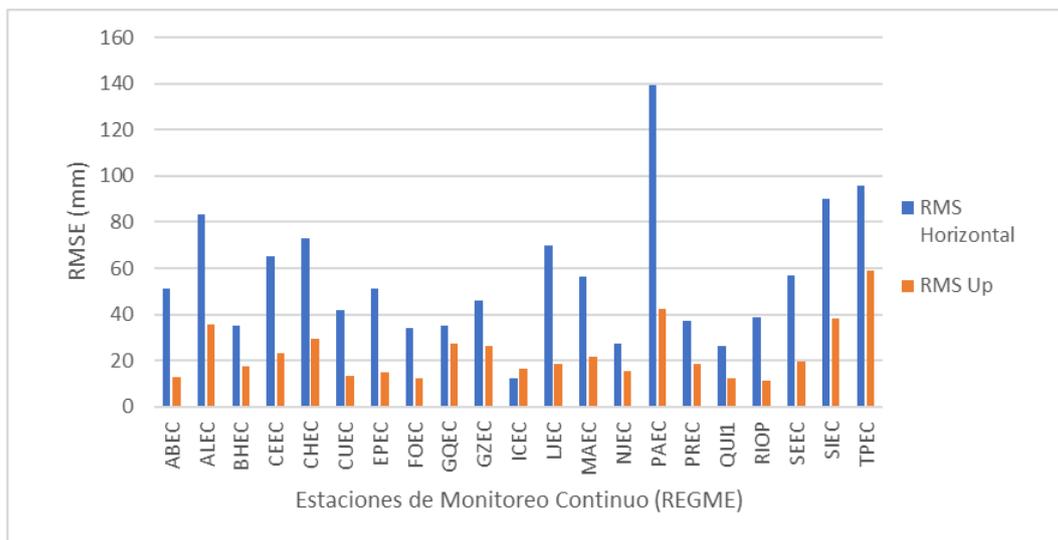
Desviación estándar de las diferencias de las soluciones semanales utilizando efemérides ultrarrápidas

| Nº | Estación | Este Desviación Estándar (mm) | Norte Desviación Estándar (mm) | Up Desviación Estándar (mm) |
|----|----------|--|---|--------------------------------------|
|----|----------|--|---|--------------------------------------|

| | | | | |
|----|--------|---------|---------|---------|
| 1 | ABEC | 48,941 | 8,605 | 12,424 |
| 2 | ALEC | 83,536 | 16,266 | 35,923 |
| 3 | BHEC | 34,161 | 10,379 | 17,489 |
| 4 | CEEC | 65,794 | 11,597 | 23,940 |
| 5 | CHEC | 71,175 | 8,407 | 27,834 |
| 6 | CUEC | 41,526 | 7,483 | 13,188 |
| 7 | CXEC | 243,827 | 54,477 | 75,052 |
| 8 | EPEC | 51,650 | 7,301 | 15,197 |
| 9 | FOEC | 32,983 | 8,736 | 12,383 |
| 10 | GQEC | 34,332 | 8,873 | 28,041 |
| 11 | GZEC | 45,784 | 8,917 | 24,269 |
| 12 | ICEC | 9,084 | 7,550 | 16,688 |
| 13 | LJEC | 68,483 | 10,498 | 18,049 |
| 14 | MAEC | 56,237 | 7,928 | 20,930 |
| 15 | MHEC | 302,498 | 21,688 | 28,216 |
| 16 | NJEC | 24,966 | 8,085 | 15,416 |
| 17 | PAEC | 130,083 | 10,461 | 39,865 |
| 18 | PLEC | 749,002 | 201,869 | 678,085 |
| 19 | PREC | 33,666 | 8,283 | 18,743 |
| 20 | QUI1 | 25,741 | 7,735 | 12,262 |
| 21 | RIOP | 37,929 | 8,376 | 10,639 |
| 22 | SEEC | 55,505 | 7,839 | 20,041 |
| 23 | SIEC | 91,856 | 9,586 | 38,399 |
| 24 | TPEC | 97,529 | 15,650 | 40,806 |
| 25 | TSEC | 351,012 | 35,159 | 177,804 |
| | Media | 111,492 | 20,470 | 56,867 |
| | Máximo | 749,002 | 201,869 | 678,085 |
| | Mínimo | 9,084 | 7,301 | 10,639 |

Figura 31

Gráfico de las RMSE de los componentes horizontal y vertical de las estaciones de la REGME (efemérides ultrarrápidas)



En la tabla 26, se muestran los RMSE de los componentes planimétricos y altimétricos de la comparación entre soluciones procesadas utilizando efemérides ultrarrápidas y las soluciones SIRGAS en sistema de coordenadas topocéntricas (ENU). Se analiza que nuevamente las estaciones CXEC, PLEC Y TSEC dieron un valor exagerado superando los 700 mm, mientras que para el resto de las estaciones en la coordenada Norte no cumplen con el rango de 5 cm, y para la coordenada Este, 22 estaciones cumplieron con el rango permitido, de la misma manera en coordenada Altitud, 22 de las 15 estaciones cumplieron con el límite expuesto, para este caso el límite de 5 cm que permite el IGM es el mismo que se espera cuando se trabaja con archivos de orbita ultrarrápidas.

En la figura 31 se observan las RMSE graficadas, donde de igual manera se unieron los RMSE Norte y RMSE Este, para tener un RMSE Horizontal, en esta ocasión la estación PAEC en la componente horizontal con un 139,277 mm y el valor máximo para la componente Up, es en la estación TPEC con un valor de 59,157 mm.

Resumen de Tiempos y RMSE del procesamiento de las soluciones semanales

A continuación, se observa la tabla 28, en donde se resume los tiempos de recopilación de las efemérides precisas y su procesamiento en Bernese. Al igual se detalla las precisiones generales obtenidas en las coordenadas X, Y, Z según la efemérides y órbita utilizada para el procesamiento. Finalmente, observamos en la tabla 29 el promedio de los RMSE, el cual indica que el procesamiento con efemérides finales tiene una precisión al

milímetro mientras que el procesamiento utilizando efemérides rápidas y ultrarrápidas tienen una precisión al nivel del centímetro. Una vez excluidas las estaciones con mayor RMSE, las cuales son CXEC, PLEC Y TSEC, se observa que se obtiene un mejor promedio en todos los procesamientos y cumpliendo el límite fijado dentro de la investigación en los procesamientos con efemérides finales y rápidas.

Tabla 28

Resumen de los tiempos de cada procesamiento

| | Efemérides Precisas | | |
|---|---------------------|----------|---------------|
| | Finales | Rápidas | Ultrarrápidas |
| Tiempo máximo de publicación | 16 días | 48 horas | 7 horas |
| Tiempo mínimo de publicación | 13 días | 24 horas | 6 horas |
| Tiempo máximo de recopilación/preparación y otros insumos | | 72 horas | |
| Tiempo máximo de procesamiento | 45 horas | 50 horas | 50 horas |
| Tiempo mínimo de procesamiento | 28 horas | 35 horas | 35 horas |
| Tiempo máximo de entrega de las soluciones semanales | 21 días | 7 días | 7 días |

Tabla 29

Resumen de los RMSE de cada procesamiento

| | Efemérides Precisas | | |
|----------------------------------|---------------------|---------|---------------|
| | Finales | Rápidas | Ultrarrápidas |
| Valor medio RMSE Horizontal (mm) | 6,505 | 49,304 | 113,932 |

| | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|
| Valor medio RMSE Up (mm) | 9,518 | 52,213 | 57,535 |
| Valor medio RMSE Horizontal (mm)* | 5,889 | 9,311 | 66,993 |
| Valor medio RMSE Up (mm)* | 8,747 | 17,362 | 23,343 |

Nota: El “*” hace referencia a un nuevo RMSE calculado a partir de la exclusión de las estaciones CXEC, PLEC Y TSEC

Transformación de ITRF2014 a IRTF2020

Las soluciones semanales obtenidas a través del procesamiento en el software Bernese 5.2 están en el ITRF2014 por lo que se procedió a transformar las coordenadas a ITRF2020. Se obtuvieron los parámetros de transformación de la página web de la ITRF: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations>. Y en los anexos se encuentran las coordenadas de las estaciones de la REGME de las 18 semanas muestreadas utilizando efemérides/órbitas finales dentro del procesamiento PPP en ITRF2020 época 2015.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Una vez completado las distintas etapas propuestas en la metodología del presente proyecto, se generaron las soluciones semanales en el marco de referencia ITRF2014 que luego fueron transformados al marco ITRF2020. El análisis realizado de las coordenadas geocéntricas de las 27 estaciones de monitoreo continuo de la red GNSS del Ecuador obtenidas con respecto a la realización SIRGAS de las respectivas semanas (2190-2207) concluyó que el procesamiento y materialización de las soluciones se encuentran dentro de los límites establecidos dentro de la investigación. El procesamiento con efemérides precisas finales otorga precisiones en el orden del milímetro mientras que el procesamiento con efemérides rápidas y ultrarrápidas alcanzan precisiones en el orden del centímetro.

Anterior al procesamiento de los datos GNSS es un requisito fundamental definir los parámetros y modelos adecuados, para esta investigación se contó con modelos de corrección atmosférica, troposférica y oceánica, los mismos que minimizan al máximo los errores de posicionamiento, otorgando así mejores resultados en el procesamiento de datos. Para la obtención de datos ninguna de las estaciones cumplió con los días totales de recolección, aumentando el error general de precisión por falta de información. En cambio, para los archivos de reloj solo se usaron dentro del procesamiento las órbitas finales, los cuales proporciona el IGS con un intervalo de 30 segundos, por el contrario, para el procesamiento con órbitas rápidas y ultrarrápidas, se obtuvieron del archivo de efemérides con el software Bernese, con un intervalo de una hora en ambos casos, debido a que dio una mejor precisión en el resultado final, que ocupando los archivos que proporciona el IGS.

Dentro del análisis de la precisión externa, en el cual se compararon las soluciones semanales procesadas con la soluciones semanales oficiales de SIRGAS se obtuvieron los siguientes resultados: las soluciones a partir de efemérides precisas finales están en el orden del milímetro, las cuales no superan los 5 cm que propuso para esta investigación, para las soluciones con efemérides rápidas, las estaciones CXEC, PLEC y TSEC, dieron valores altos para los que se esperaba, y finalmente las soluciones utilizando efemérides ultrarrápidas

alcanza diferencias medias superiores a los 5 cm en los RMSE. Debido a estos resultados se concluye que el procesamiento con efemérides y productos de reloj finales generan coordenadas de mayor precisión mientras que el procesamiento con efemérides rápidas genera soluciones más o menos similares, pero con mayor disponibilidad y flexibilidad en cuanto a tiempos de descarga y procesamiento de datos. Dado los resultados de las estaciones de CXEC, PLEC y TSEC se concluye que los insumos de dichas estaciones se encuentran con irregularidades puesto a que generan valores atípicos y por lo tanto se deberían excluir de los resultados.

Las estaciones de monitoreo continuo JNEC y LAEC de la REGME, no se pudieron comparar con las soluciones semanales que otorga SIRGAS, debido a que SIRGAS no proceso ninguna de las 18 semanas que se planificaron para esta investigación. Por consiguiente, en el procesamiento con el software Bernese realizado en este proyecto, se logró definir las soluciones semanales para las estaciones anterior mencionadas, el cual es un logro en esta investigación debido a que se pueden obtener soluciones semanales de estaciones de la red GNSS del Ecuador que no proporciona SIRGAS.

Cabe resaltar que el software científico Bernese versión 5.2 es un software de procesamiento de datos GNSS de alta gama. Su sencillo manejo y operabilidad estableció los cimientos de la investigación garantizando un procesamiento de datos sin problemas o retrasos durante el período del estudio. Su interfaz que consta de un menú general con pestañas desplegadas es amigable para los usuarios y además para cada opción de procesamiento posee la herramienta "Help on context" o ayuda en el contexto para guiar al usuario sobre el software y herramientas que posee.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el mismo estudio utilizando diferentes tipos de software GNSS, de preferencia software libre, como GAMIT/GLOBK y GipsyX. Con la finalidad de verificar y/o mejorar los tiempos de procesamiento y precisión alcanzados en la investigación presente. Tener diferentes opciones en cuanto a software de procesamiento mejora la calidad de la investigación y de los resultados.

Al igual se recomienda utilizar como base el proyecto de investigación presente para realizar un Servicio de posicionamiento GNSS en línea del Ecuador, siendo la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” proveedor de dicho servicio. Al ser el encargado de procesar y proveer coordenadas semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, la Universidad sería pionero de tal servicio en línea para el Ecuador y un referente en las Américas.

Dentro del proyecto de investigación se trabaja con cientos de archivos GNSS de distintas extensiones, por lo que se puede mezclar o incluso perder información ya recopilada o incluso ya procesada. Es recomendable crear carpetas de trabajo y nombrarlas por las extensiones de archivos que almacenan, dentro de los discos locales de la CPU o aún mejor en nubes de almacenamiento. Por último, respaldar la información es una opción segura y necesario al momento de realizar estudios como éste, ya que en el momento de procesar la información o ejecutar scripts de tratamiento GNSS se modifican los insumos de manera irreversible.

Como se mencionó dentro de la metodología de la investigación, se utilizó el entorno BPE del software Bernese para automatizar el procesamiento de las observaciones GPS. Al igual que se creó un PCF (Process Control File) nuevo para incluir todas las opciones de procesamiento necesarias para realizar el tratamiento de datos GNSS y generación de las soluciones semanales. Se recomienda utilizar las herramientas descritas ya que facilitan el proceso automatizándolo, lo cual ahorra tiempo y recursos. El procesamiento tiene un tiempo de 6 a 8 horas de duración por cada solución semanal, sin la necesidad de estar presentes durante su ejecución gracias al BPE del Bernese. De manera contraria, si no se hubiera utilizado el BPE, el tiempo y ejecución se entorpecería, lo que podría incluso provocar errores humanos al momento de procesar.

Por último, dado la cantidad de archivos RINEX de las estaciones de la REGME que se tuvo que descargar del geoportal del IGM del Ecuador, se sugiere contactarse directamente con la Institución para obtener los datos de manera más eficaz e inmediata.

Esto se propone ya que dentro del geoportal sólo se permiten la descarga de archivos de 5 estaciones por día lo que dificulta la obtención de dichos archivos de observación RINEX y ya que no todas las estaciones de monitoreo continuo se encuentran en la red SIRGAS o IGS.

Bibliografía

- Abdallah, A. (2016). Precise Point Positioning for Kinematic Applications to Improve Hydrographic Survey. *Aswan University, January*, 119–128. https://www.researchgate.net/publication/322775695_Short_Tutorial_for_Bernese_GNSS_Software_V_52
- Abdallah, A., & Schwieger, V. (2015). Kinematic Precise Point Positioning (PPP) Solution for Hydrographic Applications Kinematic Precise Point Positioning (PPP) Solution for Hydrographic Applications. *FIG Working Week 2015 - From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World*, 19(May 2015), 17–21. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts04a/TS04A_abdallah_schwieger_7506_abs.pdf
- Bidikar, B., Sasibhushana Rao, G., Ganesh, L., & Santosh Kumar, M. (2014). Satellite Clock Error and Orbital Solution Error Estimation for Precise Navigation Applications. *Positioning*, 05(01), 22–26. <https://doi.org/10.4236/pos.2014.51003>
- Blick, G. (2017). *Manual de Marcos de Referencia en la Práctica*. Federación Internacional de Geómetras (FIG). https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub64/Figpub64_es.pdf
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7), 3–6. <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>
- Bonnor, N. (2012). A brief history of global navigation satellite systems. *Journal of Navigation*, 65(1), 1–14. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000506>
- Brunini, C., & Sánchez, L. (2019). Primeros veinte años de SIRGAS. *Revista Cartográfica*, 89, 7–46. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i89.484>

- Capitaine, N. (2012). Micro-arcsecond Celestial Reference Frames: Definition and realization - Impact of the recent IAU Resolutions. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(8), 1162–1184. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/8/013>
- Cetin, S., Aydin, C., & Dogan, U. (2019). Comparing GPS positioning errors derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS software packages: A case study in CORS-TR in Turkey. *Survey Review*, 51(369), 533–543. <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1505349>
- Cioce, V. J., Martínez, W. A., Mackern, M. V, Rodino, R. P., & de Freitas, S. R. (2017). SIRGAS en el Contexto del Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF): Evolución , Alcances y Perspectivas. *II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial*, 1–8.
- Cisneros, D. A. (2013). Análisis De La Red Nacional Gps Pasiva Enlazada Al Sistema De Referencia Sirgas95 Y Su Evolución Hacia La Nueva Infraestructura Soportada Por La Red Gns De Monitoreo Continuo Del Ecuador. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1–27.
- Cisneros, D., & Nocquet, J.-M. (2017). Actualización preliminar del Sistema Nacional de Referencia Espacial-SIRGAS-Ecuador, posterior al terremoto de Pedernales 7.8 Mw, 16 de abril de 2016. *Revista Geofísica*, 41–79.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2. In *Astronomical Institute, University of Bern* (Vol. 3, Issue December 2015). <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- Furonés, Á. M. (2011). Sistema y marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas. *Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría*, 1–22.
- Figurski, M., & Nykiel, G. (2017). Investigation of the impact of ITRF2014/IGS14 on the positions of the reference stations in europe. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14(4),

401–410. <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0021>

Ge, M., Chen, J., Douša, J., Gendt, G., & Wickert, J. (2012). A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime. *GPS Solutions*, 16(1), 9–17. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0206-z>

Griffiths, J., & Ray, J. R. (2009). On the precision and accuracy of IGS orbits. *Journal of Geodesy*, 83(3–4), 277–287. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0237-6>

Gurtner, W., & Estey, L. (2007). RINEX The Receiver Independant Exchange Format. *IGS Workshop 2012*, 104, 1–74.

Gurtner, W., & Estey, L. (2018). RINEX-the receiver independent exchange format version 3.04. *International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104)*, 104, 1–74.

Hatanaka, Y. (2008). A compression format and tools for GNSS observation data. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 55, 21–30.

IGM. (2020). *Adopción Del Nuevo Marco Geodésico De Referencia Para El Ecuador (Sirgas-Ecuador) Mayo - 2020*. http://www.geograficomilitar.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/proyecto_sirgas.pdf

Instituto Oceanográfico de la Armada. (2005). Derrotero. Guayaquil: Departamento de Ayudas a la Navegación. Recuperado el 07 de diciembre de 2021, de https://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero_2005.pdf

Instituto Oceanográfico de la Armada. (2005). De La Costa Continental E Insular Del Ecuador. *Armada Del Ecuador Instituto Oceanografico*, 4, 56.

International GNSS Service, & RINEX Working Group and Radio Techincal Commission for Maritime Services Special Committee. (2013). RINEX The Receiver Independant Exchange Format. *IGS Workshop 2012*, 104, 1–74.

Januszewski, J. (2018). GNSS frequencies, signals, receiver capabilities and applications.

Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin-Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej W Szczecinie, 54(126), 57–62. <https://doi.org/10.17402/285>

Jekeli, C. (2012). Geometric reference systems in geodesy. *Report*, July.

Johnston, G., Riddell, A., & Hausler, G. (2017). The International GNSS Service. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 967–982. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33

José, Z. M., Ricardo, R., & Tierra, A. (2015). Transformación Bidimensional entre PSAD56 e ITRF08 usando métodos de Helmert y Molodensky. *IX CONGRESO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPE 2014*, July, 111–116.

Karbon, M., Belda, S., & Nilsson, T. (2019). Impact of the terrestrial reference frame on the determination of the celestial reference frame. *Geodesy and Geodynamics*, 10(1), 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.11.001>

Kearns, T. J., Wang, G., Turco, M., Welch, J., Tsibanos, V., & Liu, H. (2019). Houston16: A stable geodetic reference frame for subsidence and faulting study in the Houston metropolitan area, Texas, U.S. *Geodesy and Geodynamics*, 10(5), 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.05.005>

Kouba, J. (2009). A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products. *Geodetic Survey Division Natural Resources Canada Ottawa*, 6, 34. <http://graypantherssf.igs.org/igscb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>

Kouba, J., & Springer, T. (2001). New IGS Station and Satellite Clock Combination. *GPS Solutions*, 4(4), 31–36. <https://doi.org/10.1007/PL00012863>

Labib, B., Yan, J., Barriot, J. P., Zhang, F., & Feng, P. (2019). Monitoring Zenithal Total Delays over the three different climatic zones from IGS GPS final products: A comparison between the use of the VMF1 and GMF mapping functions. *Geodesy and Geodynamics*, 10(2), 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.11.005>

- Lambert, S. (2013). Time stability of the ICRF2 axes. *Astronomy and Astrophysics*, 553. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321320>
- Lechner, W., & Baumann, S. (2000). Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1–2), 67–85. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00056-3)
- Liu, N., Liu, J. C., & Zhu, Z. (2017). Test of source selection for constructing a more stable and uniform celestial reference frame. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466(2), 1567–1574. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3156>
- Luna, M. (2017). *Contribución a la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador a partir de datos GNSS*. Universidad politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/48790/1/MARCO_LUNA_LUDENA_01.pdf
- Lyu, D., Zeng, F., Ouyang, X., & Zhang, H. (2020). Real-time clock comparison and monitoring with multi-GNSS precise point positioning: GPS, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, 65(1), 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.029>
- Ma, L., Wang, X., & Li, S. (2019). Accuracy analysis of GPS broadcast ephemeris in the 2036th GPS week. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 631(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/631/4/042013>
- Martín, A. (2020). *Sistemas De Referencia Geodesicos*. August, 41–42. https://www.researchgate.net/publication/343627274_4-SISTEMAS_DE_REFERENCIA_GEODESICOS
- Medina, F. (2010). *Que son los Archivos RINEX*. 1–6.
- Métivier, L., Altamimi, Z., & Rouby, H. (2020). Past and present ITRF solutions from geophysical perspectives. *Advances in Space Research*, 65(12), 2711–2722. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.031>
- Monmonier, M. (2015). *The History of Cartography* (pp. 1–10). The University of Chicago

Press.

Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., & Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 59(7), 1671–1697. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>

Moya-Zamora, J., & Cedeño-Montoya, B. (2017). *Basic Concepts in Geodesy As an Input for Adequate Treatment of Geospatial Information*. 71–100.

Moya Zamora, J., Bastos Gutiérrez, S., & Álvarez Calderón, A. (2021). Parámetros de transformación entre los marcos geodésicos CR05 y CR-SIRGAS contemplando diferentes soluciones ITRF. *Revista Ingeniería*, 31(1), 21–50. <https://doi.org/10.15517/ri.v31i1.43854>

Orduña Diaz, J. A. (2019). *Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso*. (PPP: Precise Point Positioning). 85–144.

Petrovski, I. G., & Tsujii, T. (2012). *Digital satellite navigation and geophysics: A practical guide with GNSS signal simulator and receiver laboratory*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511659072>

Pozo Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema De Posicionamiento Global (Gps): Descripción, Análisis De Errores, Aplicaciones Y Futuro. *ETS Ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga*, 174. <http://www.oocities.org/es/forogps/infografia/gps5.pdf>

Priego De Los Santos, J. E. (2012). *Análisis y predicción de lluvias intensas en la Comunidad Valenciana basados en la estimación del contenido de vapor de agua atmosférico obtenido con técnicas GNSS*.

Qiu, C., Wang, X., Li, Z., Zhang, S., Li, H., Zhang, J., & Yuan, H. (2020). The performance of

- different mapping functions and gradient models in the determination of slant tropospheric delay. *Remote Sensing*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/RS12010130>
- Shi, C., Guo, S., Gu, S., Yang, X., Gong, X., Deng, Z., Ge, M., & Schuh, H. (2019). Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in the existence of data discontinuity. *Journal of Geodesy*, 93(4), 515–528. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1178-3>
- Shirazian, M., Jazireeyan, I., & Bagherbandi, M. (2022). Reality measure of the published GPS satellite ephemeris uncertainties. *Journal of Spatial Science*, 67(2), 287–295. <https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1746702>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s13369-011-0162-5>
- Soycan, M., Soycan, A., & Tunalıođlu, N. (2017). Transformacija deformiranih geodetskih mrež v nove referenčne koordinatne sisteme: študija primera transformacije ED50-ITRFXX v turčiji. *Geodetski Vestnik*, 61(1), 58–75. <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.01.58-75>
- Specht, C., Nowak, A., & Koc, W. (2011). *Transport Systems and Processes – Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Londres: CRC Press – Taylor & Francis Group. doi:<http://dx.doi.org/10.1201/b11347-14>
- Taborda, E., & Bernal, A. (2017). *Procesamiento en Entorno Web de datos GNSS Aplicando Metodolog[ia de Punto Preciso PPP*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- TUSAT, E., & Ozyuksel, F. (2018). Comparison of Gps Satellite Coordinates Computed From Broadcast and Igs Final Ephemerides. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 12–19. <https://doi.org/10.26833/ijeg.337806>

Valverde-Calderón, J. (2020). Estudio del efecto de un terremoto sobre un marco geodésico de referencia. *Uniciencia*, 34(1), 1. <https://doi.org/10.15359/ru.34-1.1>

Xiong, J., & Han, F. (2020). Positioning performance analysis on combined GPS/BDS precise point positioning. *Geodesy and Geodynamics*, 11(1), 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.11.001>

Zurita, P. (2000). Adaptado de Sánchez 2000, *Sistemas de Referencia*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Apéndices