



Análisis de soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando GAMIT/GLOBK y Bernese.

Galárraga Benavides, Luis Francisco y Jaramillo Bravo, Andrés Sebastián

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 Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Dr. Luna Ludeña, Marco Patricio

10 de septiembre del 2021



Document Information

Analyzed document TESIS_JARAMILLO_GALÁRRAGA_biblioteca.docx (D111758035)
Submitted 8/27/2021 5:18:00 PM
Submitted by
Submitter email biblioteca@espe.edu.ec
Similarity 9%
Analysis address biblioteca.GDC@analysis.orkund.com



Firmado digitalmente por:
**MARCO
PATRICIO LUNA
LUDENA**



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 “**Análisis de soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando GAMIT/GLOBK y Bernese**” fue realizado por los señores **Galárraga Benavides, Luis Francisco (Capt.) y Jaramillo Bravo, Andrés Sebastián** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 01 de septiembre de 2021



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

C.I: 1102596044



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Galárraga Benavides, Luis Francisco (Capt.)** y **Jaramillo Bravo, Andrés Sebastián**, con cédulas de ciudadanía n° 1717323552 y 1719216150, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis de soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando GAMIT/GLOBK y Bernese** 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, 01 de septiembre de 2021

Firma:

**Capt. Galárraga Benavides Luis
Francisco**

C.C: 1717323552

Firma:

Jaramillo Bravo Andrés Sebastián

C.C: 1719216150



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Galárraga Benavides, Luis Francisco (Capt.)** y **Jaramillo Bravo, Andrés Sebastián**, con cédulas de ciudadanía n° 1717323552 y 1719216150, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Análisis de soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando GAMIT/GLOBK y Bernese"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 01 de septiembre de 2021

Firma:

**Capt. Galárraga Benavides Luis
Francisco**

C.C: 1717323552

Firma:

Jaramillo Bravo Andrés Sebastián

C.C: 1719216150

Dedicatoria

A lo largo de mis años me pude dar cuenta que hay muchas cosas en las que soy bueno, que hay muchas destrezas y habilidades que pensé no sería capaz de alcanzarlas, así mismo estoy consciente de que aún faltan muchas más por descubrir, pero todo esto no sería posible sin la ayuda de Dios y mis padres, es por esta razón que quiero dedicar este trabajo a ellos.

En primer lugar, a Dios por otorgarme la vida y permitirme culminar esta etapa, porque a pesar de no ser merecedor de su amor y bondad su fidelidad en mi vida es constante.

A mis padres Edgar Jaramillo e Isabel Bravo, porque gracias a ellos, a su amor y esfuerzo soy lo que soy. Una vez escuche algo que me llevo hasta el día de hoy, y quiero dedicárselo a mis padres, sueño y lucho por hacer mi vida, por cumplir mis sueños y alcanzar mis metas y aunque me vaya a miles de kilómetros, la familia siempre irá conmigo, y se verá reflejado en los hábitos, en los gestos, en las decisiones que tome, en los actos de amor y bondad, jamás seré libre ni estaré solo porque su amor siempre estará conmigo y esa es la más grande bendición que puedo tener en mi vida. Les dedico este trabajo y todo el esfuerzo que trae consigo.

A mi hermana Mayté, por ser mi luz y felicidad en todo momento, por ser mi cómplice y mi consejera. Gracias por todo lo que has hecho por mí a lo largo de la universidad, te amo.

A toda mi familia, principalmente a mi abuelita y mi tía, sin su ayuda desinteresada, sin sus consejos, sin su educación hoy no estaría aquí.

A mi compañero de tesis Capt. Francisco Galárraga, Paco, porque más que un compañero de universidad se ha convertido en un hermano de vida, su esfuerzo y dedicación por culminar esta etapa se ven reflejados hoy en este trabajo.

Así mismo, quiero dedicar este trabajo, a mi segunda familia a mis amigos y amigas gracias a todos y cada uno de ustedes, sin excluir a nadie, gracias por sus palabras de apoyo cuando las necesitaba, por los momentos compartidos y por siempre estar prestos a brindarme su desinteresada ayuda. Para culminar, también quiero dedicar este trabajo a todas aquellas personas que por su amor y cariño dejaron huella en mi vida, gracias por ser parte de este camino porque lo bueno siempre quedará en el corazón, con todo mi cariño y esfuerzo.

Andrés Sebastián Jaramillo Bravo

Dedicatoria

“La disciplina, tarde o temprano, vencerá a la inteligencia”, frase que gobernó mi etapa de permanencia en esta excelsa institución universitaria y me ha permitido cristalizar esta meta académica.

El presente trabajo es dedicado a Dios, ser supremo que con su benevolencia me ha permitido nuevamente vivir uno de los más importantes y gratificantes momentos en mi vida personal y profesional.

A mis queridos y abnegados padres Ximena Benavides y Alfredo Galárraga quienes, con su amor, apoyo y paciencia me han encaminado durante todos los proyectos de mi vida guiándome y bendiciéndome, coexistiendo como pilar fundamental en la consecución de este anhelado objetivo.

A mis hermanos, sobrino Cristopher Patricio, y a mi amada novia Karlita Carrasco quienes siempre confiaron y estuvieron pendientes de mi en todo momento.

A mi compañero y amigo, el Sr. Andrés Jaramillo Bravo, un hermano de otro vientre, quien siempre me dio su confianza y estuvo a mi lado, codo a codo venciendo los problemas diarios con empeño.

CAPT. Luis Francisco Galárraga Benavides

Agradecimiento

Muchas veces las palabras no alcanzan para expresar toda la gratitud con aquellas personas e Instituciones que han sumado su granito de arena para la culminación de este proyecto, que permite culminar una muy importante etapa de vida.

En primer lugar, agradecer a Dios, nuestros padres, hermanas y hermanos, profesores de la carrera, amigos y amigas en general, gracias por formar parte de este camino.

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

Especial agradecimiento al Dr. Christian Pilapanta, por su desinteresada ayuda a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo, su guía fue pilar primordial para alcanzar los objetivos y metas planteadas.

Al Ing. Izar Sinde, por que más que profesor se ha convertido en un compañero de experiencias profesionales.

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.

En fin, de corazón gracias a todas las personas que directa o indirectamente nos ayudaron a lo largo de este recorrido.

Andrés y Paco

Índice de Contenido

Índice de Contenido	9
Índices de Tablas	15
Índices de Figuras	17
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I	21
Introducción	21
Antecedentes	21
Planteamiento del problema	23
Justificación e importancia.....	25
Objetivos	26
<i>Objetivo General</i>	26
<i>Objetivos específicos</i>	26
Capítulo II	27
Marco teórico	27
Sistemas de referencia	27
<i>Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS)</i>	28
<i>Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS)</i>	28
<i>Solución IGS14 como Marco de Referencia para los productos IGS y SIRGAS</i>	29
Ajuste de redes geodésicas.....	30

	10
<i>Método de mínimos cuadrados</i>	31
<i>Filtro de Kalman</i>	33
Errores de posicionamiento	35
Sistema Global de Navegación por Satélite – GNSS.....	43
<i>GLONASS</i>	44
<i>Señales de los satélites GLONASS (frecuencias)</i>	45
<i>GPS</i>	46
<i>Señales de los satélites GPS (frecuencias)</i>	47
Archivos RINEX y SINEX	48
<i>RINEX</i>	48
<i>SINEX</i>	53
Software Bernese 5.2	56
Software Gamit/Globk 10.7.....	58
Ventajas del software científico frente al comercial.....	59
Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME).....	60
Capítulo III	62
Metodología	62
Generalidades	62
Identificación de la zona de estudio.....	63
<i>Diseño de la red geodésica y elección del período de rastreo</i>	63
Software Científico GAMIT/GLOBK 10.7	66

<i>Estructura física y lógica del software</i>	67
<i>Procesamiento automático por lotes con los módulos sh_gamit y sh_glred</i>	68
<i>Principales archivos generados por el software</i>	70
<i>Principales archivos de control a ser configurados</i>	71
Software Científico Bernese 5.2	73
<i>Estructura del software Bernese</i>	74
<i>Preparación de archivos de entrada para el procesamiento</i>	76
<i>Principales directorios de cada campaña a procesar</i>	77
<i>Consideraciones para los archivos de entrada</i>	80
Procesamiento de datos GNSS	82
<i>Intervalo de procesamiento</i>	82
<i>Flujogramas de procesamiento</i>	82
Software GAMIT/GLOBK 10.7	83
Software Bernese 5.2	84
Recopilación y tratamiento de archivos RINEX.....	85
<i>Transformación de archivos .T02 a archivos de observación (.O)</i>	86
Procesamiento en el software GAMIT/GLOBK 10.7	88
<i>Establecimiento de parámetros de procesamiento y modelos de corrección</i>	88
<i>Inicialización del módulo sh_gamit</i>	91
<i>Análisis de resultados</i>	97
<i>Análisis de parámetros estadísticos en el archivo sh_gamit.summary</i>	98

	12
<i>Análisis de residuales, archivos “elev_res.png” y “res.png”</i>	99
<i>Inicialización del módulo sh_glred</i>	101
Procesamiento en el software Bernese 5.2	104
<i>Preparación de insumos generales</i>	104
<i>Ejecución de campañas</i>	105
<i>Generación de Process Control Files-PCF</i>	106
<i>PCF para realizar el procesamiento de las soluciones diarias y semanales</i>	108
<i>Ejecución de un PCF</i>	112
Evaluación de las soluciones finales	113
Capítulo IV	115
Resultados y Análisis	115
Generalidades	115
Disponibilidad de datos por estación	115
Evaluación de soluciones posicionales.....	117
Análisis de precisión externa de las soluciones	117
<i>Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas cartesianas semanales de SIRGAS.</i>	117
<i>Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK con la constelación GPS, en coordenadas cartesianas.</i>	120

<i>Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico Bernese 5.2 con la constelación GPS, en coordenadas cartesianas.</i>	125
<i>Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK con las constelaciones GPS y GLONASS.</i>	129
<i>Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas semanales de SIRGAS, precisión externa con respecto a un sistema local topocéntrico (ENU).....</i>	133
<i>Coordenadas ENU, GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK.....</i>	134
<i>Coordenadas ENU, GPS comparadas con GLONASS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK.....</i>	136
<i>Coordenadas ENU, GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software Bernese</i>	139
<i>Análisis de precisión interna de las soluciones</i>	142
<i>Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GPS, en el software GAMIT/GLOBK.....</i>	142
<i>Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK</i>	144
<i>Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GPS, en el software Bernese 5.2</i>	147
<i>Comparación de las soluciones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS.</i>	149

Capítulo V	152
Conclusiones y Recomendaciones	152
Conclusiones.....	152
Recomendaciones.....	155
Referencias Bibliográficas.....	157
ANEXOS.....	162

Índices de Tablas

Tabla 1	Señales de los satélites GLONASS	46
Tabla 2	Señales de los satélites GPS.....	48
Tabla 3	Estructura de un archivo RINEX de observación	51
Tabla 4	Estaciones GNSS de la red geodésica en estudio y estaciones base para el ajuste...65	
Tabla 5	Carpetas directorio de instalación del software GAMIT/GLOBK.....	69
Tabla 6	Principales archivos generados por GAMIT-GLOBK.....	70
Tabla 7	Archivos de configuración del software científico GAMIT-GLOBK.....	72
Tabla 8	Principales directorios de una campaña de procesamiento.....	78
Tabla 9	Principales consideraciones para los archivos de entrada	81
Tabla 10	Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección	88
Tabla 11	Etapas del procesamiento de datos	108
Tabla 12	Disponibilidad de datos por estación.....	116
Tabla 13	Diferencia ΔX , ΔY & ΔZ , entre coordenadas cartesianas SIRGAS y coordenadas cartesianas procesadas en el software GAMIT/GLOBK, constelación GPS.	118
Tabla 14	Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK.	120
Tabla 15	Diferencia ΔX , ΔY & ΔZ , entre coordenadas cartesianas SIRGAS y coordenadas cartesianas procesadas en el software Bernese 5.2, constelación GPS.	124
Tabla 16	Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico Bernese 5.2.....	125
Tabla 17	Diferencia ΔX , ΔY & ΔZ , entre coordenadas cartesianas GPS y coordenadas cartesianas GLONASS procesadas en el software GAMIT/GLOBK.	129
Tabla 18	Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS y con la constelación GLONASS.	130

Tabla 19 Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las soluciones semanales de SIRGAS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK.....	134
Tabla 20 Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las obtenidas de la constelación GLONASS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK.....	136
Tabla 21 Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS, procesadas en el software Bernese.....	139
Tabla 22 Resultados estadísticos de las medias (repetitividad) por estaciones procesadas, con la constelación GPS, en el software GAMIT/GLOBK.....	142
Tabla 23 Resultados estadísticos de las medias (repetitividad) por estaciones procesadas, con la constelación GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK.....	145
Tabla 24 Resultados estadísticos de las repetitividades por estaciones procesadas, con la constelación GPS, en el software Bernese 5.2.....	147
Tabla 25 Media aritmética de las precisiones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS	151

Índices de Figuras

Figura 1	<i>Red central IGS14 distribuida para alinear las soluciones GNSS globales.....</i>	<i>29</i>
Figura 2	<i>Distribución de las 51 estaciones primarias de la red IGS14.....</i>	<i>30</i>
Figura 3	<i>Refracción troposférica.....</i>	<i>38</i>
Figura 4	<i>Variaciones del centro de fase de una antena GPS</i>	<i>39</i>
Figura 5	<i>Error de rutas múltiples (multipath).....</i>	<i>40</i>
Figura 6	<i>Constelación GLONASS</i>	<i>45</i>
Figura 7	<i>Constelación GPS.....</i>	<i>47</i>
Figura 8	<i>Formato de archivo RINEX de observación GPS y GLONASS.....</i>	<i>50</i>
Figura 9	<i>Estructura de un archivo SINEX.....</i>	<i>55</i>
Figura 10	<i>Bloque SOLUTION/ESTIMATE de un archivo SINEX.....</i>	<i>56</i>
Figura 11	<i>Distribución geográfica de las instituciones que usan el Software GNSS Bernese ..</i>	<i>57</i>
Figura 12	<i>Mapa de la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador REGME.....</i>	<i>61</i>
Figura 13	<i>Red geodésica de ajuste.....</i>	<i>64</i>
Figura 14	<i>Carpetas directorio de instalación del software GAMIT/GLOBK.....</i>	<i>67</i>
Figura 15	<i>Directorio del Software Bernese.....</i>	<i>75</i>
Figura 16	<i>Directorio de campañas del Software Bernese.....</i>	<i>77</i>
Figura 17	<i>Archivo .bat que hace ejecutable el software Convert to Rinex.</i>	<i>86</i>
Figura 18	<i>CMD de Windows con la orden para ejecutar el archivo .bat.....</i>	<i>87</i>
Figura 19	<i>Principales carpetas creadas por el módulo sh_gamit.....</i>	<i>94</i>
Figura 20	<i>Archivo autcln.post.sum, día 033 semana GPS 2091, constelación GPS.....</i>	<i>95</i>
Figura 21	<i>Archivo autcln.post.sum, día 033 semana GPS 2091, constelación GLONASS</i>	<i>95</i>
Figura 22	<i>Archivo sh_gamit_033G.summary, día 033 semana GPS 2091, constelación GPS</i>	<i>97</i>
Figura 23	<i>Gráficas de residuales CEEC.033.jpg y CEEC.033_elev_res.jpg.....</i>	<i>100</i>
Figura 24	<i>Archivo globk_espe_20033_20039</i>	<i>103</i>

Figura 25 Edición de "PROCES CONTROL FILE"	107
Figura 26 Lista de programas a editar de los "Process Control Files".....	107
cFigura 27 Diferencias entre las medias de soluciones SIRGAS y datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, constelación GPS	135
Figura 28 Diferencias entre las medias de datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, comparación entre las constelaciones GPS y GLONASS.	138
Figura 29 Diferencias de las medias entre coordenadas ENU, procesados en Bernese, con la constelación GPS, comparada con SIRGAS.....	140
Figura 30 Repetitividad media de las soluciones.....	144
Figura 31 Repetitividad media de las soluciones.....	146
Figura 32 Repetitividad media de las soluciones.....	148

Resumen

Las aplicaciones de una red geodésica de estaciones permanentes GNSS es muy diversa en cuanto a las precisiones de los resultados perseguidos, variando desde precisiones milimétricas hasta aquellas centimétricas. Para que la realización del procesamiento de las observaciones GNSS sea lo más apegada a la realidad y confiable, es necesario que el procesamiento de dichos datos sea realizado en un software científico. Paquetes de software científico de procesamiento de datos GNSS como GAMIT/ GLOBK y Bernese, consideran ciertos factores que un software comercial no los toma en cuenta como son: la época de referencia, los modelos de movimiento de placas tectónicas, las velocidades de las estaciones terrestres, los modelos de mareas terrestres y oceánicas, entre otros parámetros. Finalmente, conocer los niveles de precisión que alcanzan los dos softwares científicos en el procesamiento de datos GNSS de la Red de Monitoreo Continuo Del Ecuador con las constelaciones satelitales GPS y GLONASS, a fin de poder determinar que software otorga mejores parámetros de procesamiento para el Ecuador y así mismo que constelación satelital entrega las mejores precisiones en el territorio ecuatoriano. De esta manera, el presente estudio tiene como objetivo fundamental, analizar la precisión de las soluciones alcanzadas en el procesamiento de datos GNSS de la Red de Monitoreo Continuo del Ecuador, con las constelaciones GPS y GLONASS, empleando los paquetes de software GAMIT/GLOBK y Bernese.

PALABRAS CLAVES:

- **ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO**
- **SOFTWARE CIENTÍFICO,**
- **MODELOS DE CORRECCIÓN,**
- **PRECISIONES DE POSICIONAMIENTO**

Abstract

The applications of a geodetic network of permanent GNSS stations are very diverse in terms of the precision of the results sought, varying from millimeter to centimeter precision. In order for the processing of GNSS observations to be as close to reality and as reliable, it is necessary that the processing of GNSS data be carried out in scientific software. GNSS data processing scientific software packages such as GAMIT / GLOBK and Bernese, consider certain factors that a commercial software does not take into account, such as: the reference epoch, the tectonic plate movement models, the speeds of the ground stations. , models of land and ocean tides, different realizations of a certain reference system, among other parameters. Finally, to know the levels of precision reached by the two scientific software in the GNSS data processing of the GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador (REGME) with the GPS and GLONASS satellite constellations, in order to determine which software provides the best parameters of data processing for Ecuador and also that satellite constellation delivers the best precision in the Ecuadorian territory. In this way, the present study's fundamental objective is to analyze the precision of the solutions achieved in the GNSS data processing of the GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador (REGME), with the GPS and GLONASS constellations, using the software packages GAMIT / GLOBK and Bernese.

KEYWORDS:

- **CONTINUOUS MONITORING STATIONS**
- **SCIENTIFIC SOFTWARE**
- **MODELS OF CORRECTION**
- **POSITIONING ACCURACY**

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El posicionamiento GNSS (Global Navigation Satellite Systems) es una de las tecnologías más utilizadas en levantamientos geodésicos y topográficos; aunque erróneamente se lo relaciona únicamente con la constelación satelital GPS, esta se encuentra conformada por varias constelaciones como lo son Galileo de la Unión Europea, GLONASS (Global Navigation Satellite System) de Rusia, BeiDou o Compass de China y el mencionado GPS (Global Positioning System) de Estados Unidos de América (Alves, 2009).

La Red GNSS De Monitoreo Continuo Del Ecuador – REGME, instalada y administrada por el IGM, es una red compatible con las técnicas de posicionamiento disponibles en la actualidad, como son los sistemas satelitales de navegación global: GPS, GLONASS y en un futuro GALILEO (León, 2021). La REGME actualmente está conformada por 41 estaciones cuya distribución y densidad brindan una cobertura nacional. Los productos que genera actualmente esta red GNSS, son archivos diarios de 24 horas en formato RINEX 2.11 (O y N), con un intervalo de grabación de 30 segundos de cada estación y sus correspondientes coordenadas (ITRF 2014) contenidas en las fichas técnicas.

La generación de información posicional de alta precisión en el transcurso de los últimos años, ha involucrado la creación e innovación de diversas metodologías y herramientas, orientadas a minimizar y corregir los diversos errores de origen natural y antrópico, que están presentes al momento de realizar un rastreo o levantamiento, los

mismos que tienden a generar inconsistencias, que para proyectos de investigación científica constituyen posibles problemas o conflictos (Christian Pilapanta, 2013).

Característica intrínseca de la Geodesia, es la comprobación y certificación de resultados obtenidos; mediante los diferentes procesos detallados en su contexto, de la misma manera; resulta trascendental el manejo y confrontación de numerosas pericias y paquetes de software de procesamiento, a fin de determinar el camino más idóneo para la presentación de conclusiones y soluciones (Kaniuth & Völksen, 2003).

Al surgir la necesidad o requerimiento de realizar trabajos o estudios posicionales, que conllevan alta precisión, como es el caso de redes para estudios geodésicos o geodinámicos, obligatoriamente se debe hacer uso de un software científico, en el que se va a tener en cuenta diversos factores que pueden ser modificados; ya sea los marcos de referencia, igualmente el proceso de los observables (Kaniuth & Völksen, 2003). Los softwares de carácter científico presentan algunos ítems de diferencia frente a los de carácter comercial, en particular las correcciones por cargas oceánicas y mareas terrestres (Díaz, 2019).

Seda Cetin, Cuneyt Aydin y Ugur Dogan (2018), realizaron una Comparación de errores de posicionamiento GPS derivados de paquetes de software GAMIT / GLOBK y GNSS de Berna, mediante un estudio de caso en CORS-TR en Turquía, donde obtuvieron; que ambos softwares originaron las mismas estimaciones en coordenadas, pero con diferentes estimaciones de errores.

En definitiva, en Polonia, Araszkievicz y Mariusz (2010), ajustaron su estudio en la combinación de soluciones GNSS de BERNESE y GAMIT Software, ensayando estrategias de procesamiento, modelos y algoritmos; para detectar como estos influyen en los resultados finales, presentar hasta qué punto se pueden comparar los resultados,

cuan diferentes son y cómo los paquetes informáticos pueden llegar a complementarse entre sí, para poder mejorar los resultados de futuros proyectos.

Planteamiento del problema

Las aplicaciones de una red geodésica de estaciones permanentes GNSS es muy diversa en cuanto a las precisiones de los resultados perseguidos, variando desde precisiones milimétricas: estudios geodinámicos, a precisiones mayores que el metro: navegación (Fárez, 2010). Sin embargo, la calidad en las prestaciones que ofrece la red ha de ser la máxima posible. Para que la realización del procesamiento de las observaciones GNSS sea más realista y confiable, es necesario que el procesamiento de los datos GNSS sea realizado en un software científico (Alves, 2009).

Paquetes de software científico de procesamiento de datos GNSS como GAMIT/GLOBK y Bernese, consideran ciertos factores que un software comercial no los toma en cuenta como son: la época de referencia, los modelos de movimiento de placas tectónicas, las velocidades de las estaciones terrestres, los modelos de mareas terrestres y oceánicas, distintas realizaciones de un determinado sistema de referencia, entre otros parámetros (Andrade, 2012). Estos parámetros permiten alcanzar mejores precisiones en los datos procesados.

En los últimos años, empresas y asociaciones de carácter público y privado se han manifestado con el afán de ofertar servicios para el procesamiento de datos GNSS, ya sea de manera online o a través de software libre (Barrazo & Tarrío, 2020). Las herramientas mencionadas anteriormente, han tratado de disminuir el sendero existente con el procesamiento mediante software científico; ya que éste puede presentar una

parcial complejidad en su instalación, funcionamiento y uso (falta de manuales de procesamiento de datos GNSS en software científico), lo que ha obstaculizado que la mayoría de los usuarios mengüen sus posibilidades de ocupar el proceso científico y prefieran el software de carácter comercial (Jiménez et al., 2018).

Uno de los problemas que se ha identificado en el país en cuánto a procesamiento de datos GNSS en software científico, es que no se tiene un estudio técnico en el cual se analicen y comparen las soluciones obtenidas (coordenadas) y las precisiones alcanzadas, entre softwares y constelaciones satelitales. Este análisis comparativo debe ser realizado, considerando la precisión interna y la precisión externa. La primera está referida a la repetitividad de las soluciones, es decir la precisión interna que se alcanza, la segunda está referida a una comparación de las soluciones obtenidas con la solución oficial de SIRGAS y entre soluciones con sus precisiones obtenidas entre softwares.

Es precisamente por esta razón, que se presenta la problemática de conocer los niveles de precisión que alcanzan los dos softwares científicos en el procesamiento de datos GNSS de la Red GNSS De Monitoreo Continuo Del Ecuador (REGME) con las constelaciones satelitales GPS y GLONASS, a fin de poder determinar que software otorga mejores parámetros de procesamiento de datos para el Ecuador y así mismo que constelación satelital entrega las mejores precisiones en el territorio ecuatoriano.

El análisis surge en un contexto de evolución de las metodologías de procesamiento de datos posicionales GNSS en el Ecuador. El realizar un análisis comparativo entre software de procesamiento geodésico permite verificar y validar resultados mediante la aplicación de diversas estrategias de procesamiento, así mismo realizar un análisis estadístico de los resultados permite validar la precisión de los datos obtenidos.

Justificación e importancia

La elaboración de este proyecto de titulación orientado a la validación técnica de datos posicionales GNSS en diferentes softwares científicos de procesamiento geodésicos, permite determinar los procedimientos y técnicas destinados al procesamiento y validación de los datos de la Red GNSS De Monitoreo Continuo Del Ecuador (REGME), monitoreada y custodiada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM).

El contar con manuales que permitan estandarizar el procesamiento y posterior validación de datos GNSS en software científico, como lo es Bernese y GAMIT/GLOBK, empleando las constelaciones GPS y GLONASS, permite optimizar los tiempos que se emplean en el procesamiento de datos GNSS, así mismo, realizar un análisis comparativo entre softwares permite tener una validación en cuanto a precisión alcanzada se refiere, esto último resulta de suma importancia para proyectos de carácter geodésico.

Es por ello, que se hace hincapié en un análisis comparativo centrado en el procesamiento, soluciones y precisiones obtenidas a partir del uso de diferentes softwares GNSS de alta precisión, mediante distintas metodologías de procesamiento. Los resultados obtenidos serán en beneficio directo para instituciones tanto públicas (INOCAR, IGM) como privadas, ya que se contará con una validación técnica de procesamiento de datos GNSS, con las constelaciones satelitales previamente mencionadas, en software científico.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la precisión de las soluciones alcanzadas en el procesamiento de datos GNSS de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), con las constelaciones GPS y GLONASS, empleando los paquetes de software GAMIT/GLOBK y Bernese.

Objetivos específicos

- Definir los parámetros adecuados de procesamiento de datos GNSS, con las constelaciones GPS y GLONASS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la finalidad de obtener las mejores precisiones y reducir los posibles errores de procesamiento.
- Procesar datos GNSS de la REGME con las constelaciones GPS y GLONASS en el software Bernese y GAMIT/GLOBK, para determinar la constelación satelital que alcanza mejores precisiones en el Ecuador.
- Analizar los resultados alcanzados por los softwares científicos Bernese y GAMIT/GLOBK en el procesamiento de los datos GNSS de la REGME y materialización de coordenadas, con la finalidad de conocer cuál software tiene mejores niveles de precisiones finales.
- Realizar una comparación estadística, mediante el análisis de los residuales (RMS), de las precisiones internas y externas de las soluciones de las coordenadas obtenidas, para su validación.

Capítulo II

Marco teórico

Sistemas de referencia

Un sistema de referencia está especificado como una estructura geométrica, que se encuentra constituida por un cúmulo de parámetros, variables, constantes y convenios ineludibles para figurar la posición de un determinado objeto en los campos de espacio y tiempo (López & Negrete, 2016). Al no poder usar magnitudes físicas para establecer las dimensiones de un sistema de referencia, se recurre a lo que se denomina parámetros explícitos, anticipadamente definidos como son: orientación de una tripleta de ejes en el espacio, delimitando su respectivo origen y disposición, modelos físicos y matemáticos primordiales (Martín, 2020)

En el ámbito de la geodesia satelital actual, los sistemas de referencia más empleados son: el sistema de referencia celeste internacional ICRS (International Celestial Reference System) y el sistema de referencia terrestre internacional ITRS (International Terrestrial Reference System), por sus respectivos acrónimos en el idioma inglés (Martín, 2020). Estos han sido determinados para una época específica y materializados a partir de un conjunto de puntos fiduciales, un catálogo de estrellas para el ICRS y un catálogo de posiciones y velocidades para el ITRS. El tener presente los conceptos y mandatos de estos dos sistemas de referencia, confabularán de manera acertada para alcanzar una alta precisión en la generación de una solución GNSS, a causa de que se han minimizado los errores sistemáticos concurrentes en el desarrollo del proceso de posicionamiento; visto que se ha tomado en cuenta tanto a las deformaciones, fenómenos y eventos presentes en la Tierra como a sus características intrínsecas (Christian Pilapanta, 2013).

El aporte fundamental de los sistemas de referencia, radica en la determinación de la ubicación de un punto sobre la superficie de la Tierra con una alta precisión, y al mismo tiempo, son utilizados para el análisis de las deformaciones y movimientos de la corteza terrestre, figurando como gran soporte de las ciencias cartográficas y de la Tierra (López & Negrete, 2016).

Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS)

Constituye un sistema baricéntrico, cuyo plano fundamental y origen de ascensiones se encuentran próximas al ecuador y equinoccio dinámicos J2000.0 (Arias, 1996). Este sistema va a estar materializado a través de coordenadas (asención recta y declinación) de fuentes de radio extragalácticas (Quasars) observadas por la Interferometría de Muy Larga Base (VLBI por sus siglas en inglés), Alcance Láser Satelital (SLR), Alcance del Láser Lunar (LLR) y Orbitografía Doppler y Radioposicionamiento Integrado por Satélite (DORIS).

Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS)

Constituye el sistema de referencia terrestre utilizado a escala internacional para aplicaciones científicas y de ingeniería de alta precisión. El ITRS es un sistema ideal que obligatoriamente cumple las siguientes condiciones: es un sistema geocéntrico, la base para la escala es el metro, la orientación de sus ejes es la del sistema de referencia del BIH y la evolución en el tiempo no genera rotaciones residuales con respecto a la corteza terrestre (Boucher et al., 1996).

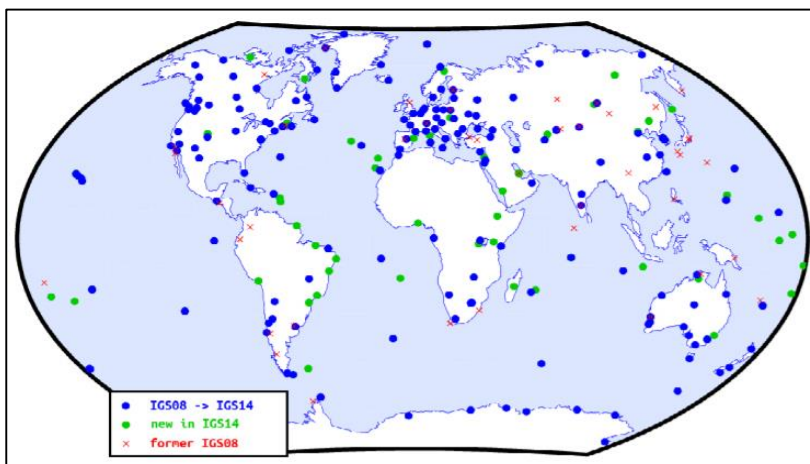
Solución IGS14 como Marco de Referencia para los productos IGS y SIRGAS

Entre el 29 de enero de 2017 (semana GPS 1934) y el 16 de mayo de 2020 (semana GPS 2105), las coordenadas semanales del marco de referencia SIRGAS están dadas en el marco de referencia IGS14.

IGS14 tiene 252 estaciones de marco de referencia adecuadas, con un tiempo de posición largo y estable. Para que las coordenadas sean consistentes se diseñó una red central IGS14 distribuida para alinear las soluciones GNSS globales (Figura 1), esta red está compuesta por 51 estaciones primarias cada una con posibles sustitutos como se puede observar en la Figura 2 (Rebischung & Schimd, 2016).

Figura 1

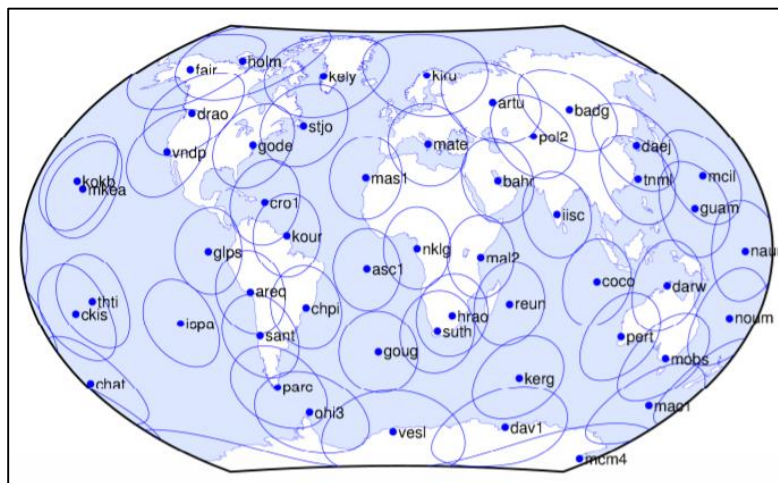
Red central IGS14 distribuida para alinear las soluciones GNSS globales



Nota: Recuperado de IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products, por Rebischung & Schmid, 2016.

Figura 2

Distribución de las 51 estaciones primarias de la red IGS14



Nota: Recuperado de IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products, por Rebischung & Schmid, 2016.

Ajuste de redes geodésicas

Una red geodésica tiene como objetivo escribir la superficie y el campo de gravedad de la Tierra y sus variaciones temporales, utilizando observaciones e incógnitas necesarias (Vicaflor, 2008). Es un conjunto de puntos de monitoreo continuo que se encuentran distribuidos estratégicamente en un territorio, en los cuales se determinan su posición geográfica y se materializan sobre el terreno con hitos o señales.

Método de mínimos cuadrados

El principio de mínimo cuadrados establece que la suma de los cuadrados de los errores residuales debe ser mínimas y este se utiliza para el ajuste de datos, cuando se tiene más observaciones de las estrictamente necesarias para la resolución del problema, además de que estas observaciones tienen errores de observación (Sevilla, 1987). Con la métrica euclídea esto es:

$$\sum_{i=1}^m v_i^2 = \text{mínimo} \quad (1)$$

Uno de los modelos matemáticos regulares que se emplean en la geodesia es el modelo de ajuste mixto de observaciones de condición y parámetros, el modelo funcional es el que se muestra a continuación:

$$F(X, L) = 0 \quad (2)$$

$$x = X - X_0 \quad (3)$$

Donde:

X : vector de parámetros ajustados de dimensión $(nx1)$

X_0 : vector de valores aproximados de los parámetros X

x : vector de parámetros incógnita

$$v = L - l \quad (4)$$

Donde:

L : vector de valores ajustados de las observaciones de dimensión $(m \times l)$

l : vector de observaciones reales de dimensión $(m \times l)$

v : vector de errores residuales (incógnitas)

$$c < m, \quad c > n, \quad c < m + n \quad (5)$$

Donde:

m : número de observaciones l

n : número de parámetros x

c : número de condiciones

$$Q = P^{-1} \quad (6)$$

Donde:

P : matriz de pesos de las observaciones l , simétrica y definida positiva de dimensión $(m \times m)$

Q : matriz cofactor a priori de las observaciones l

$$\Sigma = \sigma_0^2 Q \quad (7)$$

Donde:

σ_0^2 : varianza a priori de la unidad de

Σ : peso matriz de varianza-covarianza a priori de las observaciones l

La primera matriz de diseño de dimensión $(c \times n)$ es:

$$A = \frac{\partial F}{\partial X} \mid X_0, L_0 \quad (8)$$

La segunda matriz de diseño de dimensión $(c \times m)$ es:

$$B = \frac{\partial F}{\partial L} \mid X_0, L_0 \quad (9)$$

El modelo funcional linealizado toma la forma de:

$$Ax + Bv - t = 0 \quad (10)$$

Filtro de Kalman

Es un método usado para estimar el vector de estado de un modelo dinámico a partir de observaciones aleatorias, se considera este filtro para sistemas lineales, y los modelos dinámicos de observación se expresan (Camargo,1992):

$$X_k = T_{k,k-1}X_{k-1} + W_k, \quad (11)$$

$$L_k^b = A_k X_k + V_k \quad (12)$$

Donde:

$T_{k,k-1}$: matriz de transición entre los instantes $k - 1$ y k

W_k : vector de correcciones al modelo

L_k^b : vector ($nx1$) de las observaciones al instante k

A_k : matriz de diseño en el instante k

X_k : dinámico estado aleatorio del vector ($ux1$) en el instante k

V_k : vector ($nx1$) de ruido de las mediciones en el tiempo k

El filtro de Kalman es una combinación de predicción (estima los datos anteriores a un instante kt) y filtrado (utiliza los datos obtenidos de un período anterior hasta un instante dado kt). Las ecuaciones de predicción y filtrado se presentan a continuación (Camargo, 1992):

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k|k-1} &= T_{k,k-1} \hat{X}_{k-1|k-1} \\ \hat{X}_{k|k} &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k [L_k^b - A_k \hat{X}_{k|k-1}] \end{aligned} \quad (13)$$

Donde:

$k|k-1$: instante k considerado los datos del instante $k-1$

$k|k$: instante k considerado los datos hasta el k -ésimo instante, siendo:

$$K_k = \Sigma_{\hat{X}_{k|k-1}} A_k^T [A_k \Sigma_{\hat{X}_{k|k-1}} A_k^T + \Sigma_{L_k^b}]^{-1} \quad (14)$$

Donde K_k es conocida como la matriz de ganancia Kalman.

Las MVC de los vectores de predicción y filtrado están dados por (Camargo, 1992):

$$\begin{aligned} \Sigma_{\hat{X}_{k|k-1}} &= T_{k,k-1} \Sigma_{\hat{X}_{k-1|k-1}} T_{k,k-1}^T + \Sigma_{W_k} \\ \Sigma_{\hat{X}_{k|k}} &= [I - K_k A_k] \Sigma_{\hat{X}_{k|k-1}} \end{aligned} \quad (15)$$

Para poder realizar estimaciones con el filtro de Kalman para sistemas no lineales es necesario hacer iteraciones.

Errores de posicionamiento

El término posicionamiento se refiere a la determinación en un sistema de coordenadas determinado a objetos móviles o estacionarios, a través de técnicas apoyadas en satélites artificiales (Berné et al., 2019). A continuación, se va a describir los errores que afectan significativamente las medidas realizadas:

Posición del satélite: se da debido a las variaciones que pueden tener las órbitas debido a perturbaciones o fenómenos físicos, para poder corregir este error orbital se necesita un archivo único denominado Efeméride Satelital, que contiene las posiciones fijas de los satélites en el sistema de referencia ITRS, a intervalos de 15 minutos y precisión de 5 a 20 mm c.

Reloj del satélite: los satélites tienen relojes atómicos (cesio) que son muy exactos, debido a que si el reloj tiene una billonésima de segundo de inexactitud se produce un error de 30 cm. Este error se modeló estableciendo un polinomio de segundo grado (Orozco et al., 2020):

$$\varepsilon_{t^s} = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (16)$$

Donde:

a_0 : constante

a_1 : deriva del reloj

a_2 : aceleración del reloj

t_0 : época de referencia para coeficientes polinomiales

Reloj receptor: los receptores generalmente tienen relojes de cuarzo, que poseen una estabilidad inferior a los relojes atómicos (satélites), por lo que el error se produce por un desfase continuo de su frecuencia, este error puede eliminarse mediante el uso de diferencias de doble fase en el ajuste de la observación (Christian Pilapanta, 2018).

Efectos relativos: existe diferencia sobre las mediciones al comparar el reloj ubicado en el satélite y el reloj sobre la superficie, esto ocurre debido al principio de la diferencia potencial gravitacional entre los dos relojes y la velocidad relativa. Se puede corregir a través de la fórmula, citada por (Hernandez et al., 2001).

$$\frac{f'_0 - f_0}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 + \frac{\Delta U}{c^2} \approx -4,464 \times 10^{-10} \quad (17)$$

Donde:

f'_0 : frecuencia de emisión por satélite (10,229999999543 MHz)

f_0 : frecuencia recibida sobre la superficie terrestre (10,23 MHz)

v : velocidad del satélite en un sistema inercial

c : velocidad de propagación de la luz en el vacío

ΔU : diferencia en el potencial gravitacional

Presión de la radiación solar: la radiación solar ejerce presión sobre los satélites que puede generar una aceleración en su trayectoria, esto se puede modelar según la siguiente ecuación (Beutler, 1994).

$$\varepsilon_{r\ sol} = r_0 + D(u)e_D + Y(u)e_Y + X(u)e_X \quad (18)$$

Donde:

r_0 : aceleración inicial (valor *a-priori*)

u : argumento angular

e_D : vector unitario en la dirección satélite-sol

e_Y : vector unitario a lo largo del eje del panel solar del satélite

e_X : vector unitario ortogonal a otros vectores

$$D(u) = D_0 + D_{1,c} \cos u + D_{1,s} \sin u$$

$$Y(u) = Y_0 + Y_{1,c} \cos u + Y_{1,s} \sin u$$

$$X(u) = X_0 + X_{1,c} \cos u + X_{1,s} \sin u$$

Refracción ionosférica: los electrones libres suspendidos que se encuentran conformando la ionosfera modifican la velocidad de las señales de radio que pasan a través de esta, es un proceso dispersivo y va a depender de la frecuencia de la señal y la densidad de los electrones (Pozo Ruz et al., 2000). La corrección ionosférica viene dada por la ecuación:

$$\delta_{\rho_{ion}} = -40,3 * \frac{1}{\cos\left(\frac{R}{R+H} \sin z\right)} * \frac{Ev}{f^2} \quad (19)$$

Donde:

z : ángulo zenital al cual la señal fue capturada

R : distancia geométrica del receptor a la ionósfera

H : altura

f : frecuencia (L1 y/o L2)

Ev : contenido total de electrones vertical (VTEC)

Refracción troposférica: debido a las variaciones de temperatura y presión, y al contenido de vapor de agua presente en las nubes ocurre una refracción en la señal. La ecuación de la corrección troposférica está dada por (Alizadeh, 2013):

$$\delta_{\rho_{trp}}(z) = m_{t,d}(z)\delta_{\rho_{trp,d}}^0 + m_{t,w}(z)\delta_{\rho_{trp,w}}^0 \quad (20)$$

Donde:

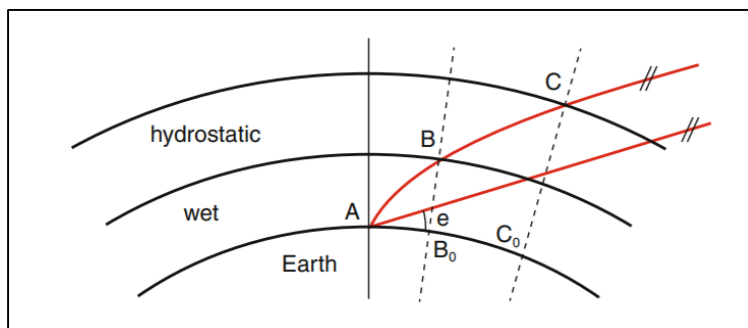
$m_{t,d}(z)$: función de mapeo troposférico del término seco

$m_{t,w}(z)$: función de mapeo troposférico del término húmedo

$\delta_{\rho_{trp}}^0$: zenit delay (valor troposférico vertical)

Figura 3

Refracción troposférica



Nota: Recuperado de Path Delays in the Neutral Atmosphere por Nilsson et al., 2013

Variaciones en el centro de fase de la antena: es un error instrumental de la infraestructura de cada equipo debido a la posición del centro de fase eléctrico y el centro mecánico, para la corrección es necesario conocer la marca y el modelo de la antena. La ecuación para calcular la variación en el centro de fase es (Seeber, 2003).

$$\Delta r_{ant} = r_0 + \Delta\phi(z, \alpha)e_{z,a} \quad (21)$$

Donde:

Δr_{ant} : variación del centro de fase

r_0 : offset medio del centro de fase

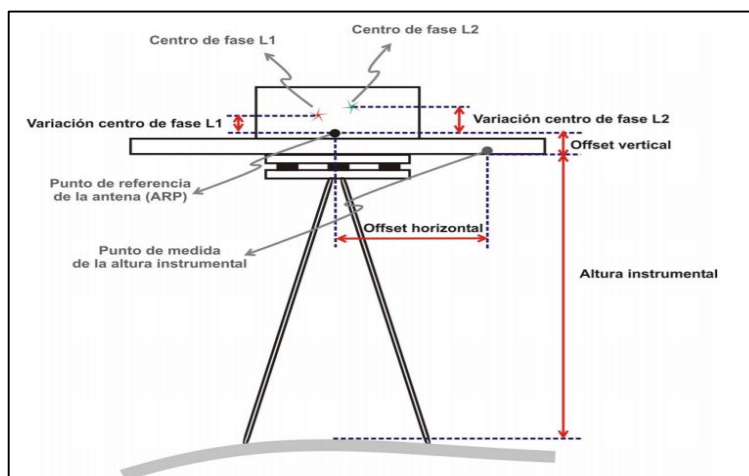
$\Delta\phi(z, \alpha)$: variación del centro de fase (función del ángulo de elevación α y el azimut del satélite z)

$e_{z,\alpha}$: vector unitario en dirección al satélite definido por:

$$e_{z,\alpha} = [\cos \alpha \sin z, \sin \alpha \sin z, \cos z]^T \quad (22)$$

Figura 4

Variaciones del centro de fase de una antena GPS

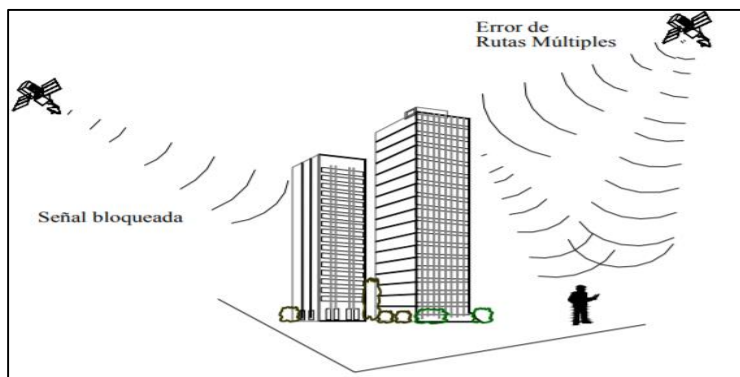


Nota: Recuperado de Variaciones del centro de fase (I1, I2) para las antenas de las estaciones de funcionamiento continuo (MAGNA-ECO) del IGAC por Sánchez, 2016.

Multitrayectoria o Multipath: la señal es reflejada en objetos opacos como edificios o montañas antes de llegar al receptor por lo que se incrementa el tiempo de viaje de la señal (Orozco et al., 2020).

Figura 5

Error de rutas múltiples (multipath)



Nota: Recuperado de Sistema de Posicionamiento Global, por Casanova L., 2016.

Disponibilidad selectiva (SA): este error se produce debido a los reportes inexactos de las órbitas de los satélites a cargo del departamento de defensa de Estados Unidos que degrada intencionalmente el nivel de precisión (Orozco et al., 2020).

Efectos geodinámicos: los efectos geodinámicos tienen impacto en la deformación de la superficie terrestre provocando errores en los componentes (horizontal) a nivel del centímetro o metro dependiendo de su magnitud y la distancia entre el punto observado y el evento geofísico (Agnew & Larson, 2007), para poder modelar este error se tiene:

$$X(t) = X_R + v(t - t_R) + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t - t_j) + \sum_{k=1}^{n_k} [s_k \sin w_k t + c_k \cos w_k t] \quad (23)$$

Donde:

X_R : posición de referencia en tiempo t_R

b_j : número de saltos (discontinuidades sistemáticas)

$v(t - t_R)$: velocidad linear de estación al punto

$H(t - t_j)$: función de Heaviside

w_k : amplitud de desplazamientos periódicos

Efecto de la deformación elástica terrestre: la tierra no es rígida por lo que se deforma según las propiedades elásticas, provocando que la distancia entre un punto ubicado en la superficie de la Tierra y el centro de masa de la Tierra, origen del sistema de coordenadas, sea variable en el tiempo. Esto provoca que la precisión en el posicionamiento sea afectada, las deformaciones se pueden clasificar en: marea polar, marea terrestre, carga oceánica y cargas por presión atmosférica (Miranda et al., 2015).

Marea polar: es la respuesta elástica cambiante de la corteza terrestre debido al desplazamiento continua del eje de rotación terrestre instantáneo, este error puede ser modelado a un punto con latitud φ , longitud λ y distancia radial \hat{r} , (Saastamoinen, 1972) a través de las ecuaciones:

$$\vec{U}_{\hat{r}polar} = -\frac{\omega_E^2 R_e}{2g} h \sin 2\varphi (m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \hat{r} \quad (24)$$

$$\vec{U}_{\varphi polar} = -\frac{\omega_E^2 R_e}{2g} l \cos 2\varphi (m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda) \varphi \quad (25)$$

$$\vec{U}_{\lambda polar} = -\frac{\omega_E^2 R_e}{2g} l \sin \varphi (-m_1 \sin \lambda + m_2 \cos \lambda) \lambda \quad (26)$$

Donde:

ω_E : velocidad angular de la rotación terrestre

g : aceleración gravitacional

h y l : números nominales de Love ($h = 0,612$ y $l = 0,085$)

m_1 y m_2 : cambio de polos en relación con el CIO (1903,0)

Mareas terrestres: incluye los movimientos de la corteza terrestre debido a fuerzas de atracción gravitacional, las mareas terrestres que producen desplazamientos verticales, esto se puede expresar por la siguiente ecuación (Saastamoinen, 1972):

$$\vec{U}_{Rterrestre} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_e R_j^3} \left\{ h_2 \vec{r} \left[\frac{3}{2} (\vec{R}_j \cdot \vec{r})^2 - \frac{1}{2} \right] + 3l_2 (\vec{R}_j \cdot \vec{r}) [\vec{R}_j - (\vec{R}_j \cdot \vec{r}) \vec{r}] \right\} \quad (27)$$

Donde:

G :

M_j : masa de la luna y el sol

M_e : masa terrestre

R_e : rayo ecuatorial de la Tierra

\vec{R}_j y R_j : vector unitario y magnitud desde el geocentro hasta la luna y el sol

\vec{r} y r : vector unitario y magnitud desde el geocentro hasta la estación

h_2 y l_2 : números nominales de Love de grado 2 ($h = 0,607$ y $l = 0,084$)

Carga oceánica: es el efecto de marea secundaria debido a la respuesta elástica de la corteza terrestre a las mareas oceánicas, produciendo una deformación del fondo marino y un desplazamiento superficial de la superficie terrestre adyacente. La carga oceánica, a diferencia de la marea interior, este error puede ser calculado por la ecuación (Saastamoinen, 2013):

$$\vec{U}_{R\text{ oceano}} = \sum_j^\infty f_i A_j \cos(\omega_j t + X_j + v_j - \phi_j) \quad (28)$$

Donde:

f_j y v_j : parámetros dependientes de la longitud del nodo lunar

ϕ_j : fase de estación

A_j : amplitud de estación

ω_j : velocidad angular de la marea en el tiempo $t = 0$

X_j : argumento astronómico en el $t = 0$

j : términos de mareas parciales

Sistema Global de Navegación por Satélite – GNSS

El término GNSS engloba a todos los Sistemas de Navegación por Satélite, estos sistemas determinan la posición y el tiempo, incluye una o más constelaciones de satélites, aviones receptores y monitoreo de la integridad del sistema con el fin de respaldar el rendimiento de navegación requerido para la operación prevista (ICAO, 2007).

El rendimiento de los GNSS depende de cuatro criterios: precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. La precisión está dada por la distribución estadística de los errores, la integridad se define como el nivel de confianza de la exactitud en la información a partir del sistema de navegación, la continuidad es la probabilidad de que el rendimiento del sistema se mantenga durante la fase de operación, y la disponibilidad es la capacidad del sistema en proporcionar información confiable en el área especificada (Zhu et al., 2018).

El funcionamiento de estos sistemas se basa en la precisión del intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal transmitida simultáneamente por varios satélites (Balsa, 2014). Las señales GNSS son proporcionadas por constelaciones de carácter global: GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou y por constelaciones regionales: QZSS y IRNSS (Berné et al., 2019).

Al incluir estas constelaciones en los sistemas GNSS se obtienen mejoras como: al tener un mayor número de satélites y señales en el espacio beneficia al posicionamiento a través de una dilución reducida de la precisión (DOP). La disponibilidad de señales no cifradas en al menos dos frecuencias permite un mejor seguimiento y disponibilidad de mediciones.

La transmisión de señales de triple frecuencia permite una mejora en la evaluación de la calidad de la señal y en la resolución de ambigüedad de enteros en navegación relativa y PPP. Los relojes de alta calidad a bordo permiten una interpolación y extrapolación más precisa de compensación de reloj (Montenbruck et al., 2017).

GLONASS

Es un sistema de navegación satelital operado por la Federación Rusa desde 1982, la constelación está conformada por 24 satélites repartidos en 3 órbitas, en cada órbita cuenta con 8 satélites (Hegarty & Chatre, 2008) .Actualmente la constelación cuenta con 27 satélites, de los cuales 23 están operativos, 1 en mantenimiento, 2 en prueba de vuelo y 1 de repuesto (Instituto Geográfico Militar, 2013).

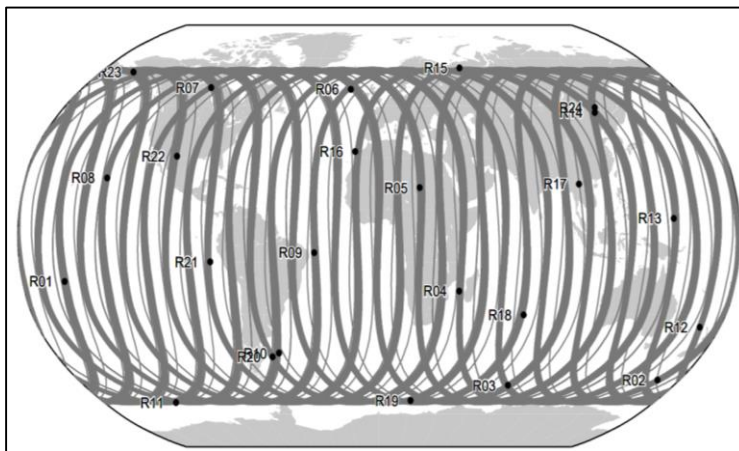
La constelación GLONASS tiene vehículos espaciales de segunda generación (GLONASS-M+) y de tercera generación (GLONASS-K), que tienen funciones avanzadas como: enlaces entre satélites, capacidad de transferencia de tiempo láser y relojes mejorados (Montenbruck et al., 2017).

Los satélites GLONASS se encuentran orbitando a una altitud de 19 130 km (200 km por debajo de los satélites GPS), tienen un período orbital de 11 horas 55 minutos y 44 segundos que corresponde a $\frac{8}{17}$ de un día sideral, después de 8 días siderales cada

satélite GLONASS completan 17 vueltas orbitales y aparecen en la misma posición con respecto a un sistema fijo en la Tierra (Figura 6). Los planos orbitales se encuentran separados por un ángulo de 120° del plano ecuatorial (Dach et al., 2015).

Figura 6

Constelación GLONASS



Nota: Recuperado de Bernese GNSS Software, por Dach et al., 2015

Señales de los satélites GLONASS (frecuencias)

La constelación GLONASS está compuesta por satélites GLONASS-M, GLONASS-M+ y GLONASS-K, todos estos bloques transmiten la señal L1/L2 C/A y GLONASS-M+ y GLONASS-K transmiten la señal de múltiple acceso por división de código L3, como se muestra en la Tabla 1 (Li et al., 2018).

Tabla 1*Señales de los satélites GLONASS*

Bloques	Señales	Satélites
M	L1/L2 C/A & P	23
M+	L1/L2 C/A & P, L3	1
K	L1/L2 C/A & P, L3	2

Nota. Recuperado de Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo por Li et al., 2018, Journal of Geodesy.

GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema satelital operado por los Estados Unidos, que permite determinar coordenadas tridimensionales en cualquier lugar, está basado en señales de radio que son emitidas por una constelación de 24 satélites activos (Serpas et al., 2004).

El GPS brinda servicios de usos múltiples que incluye: seguridad global, crecimiento económico, seguridad en el transporte y son un elemento esencial en la infraestructura económica del mundo. Existen 2 servicios que proporciona GPS: El Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS) para usuarios equipados con receptores PPS (ejército) y El Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) para usuarios civiles con capacidad de posicionamiento menos precisa (Department Of Defense USA, 2020).

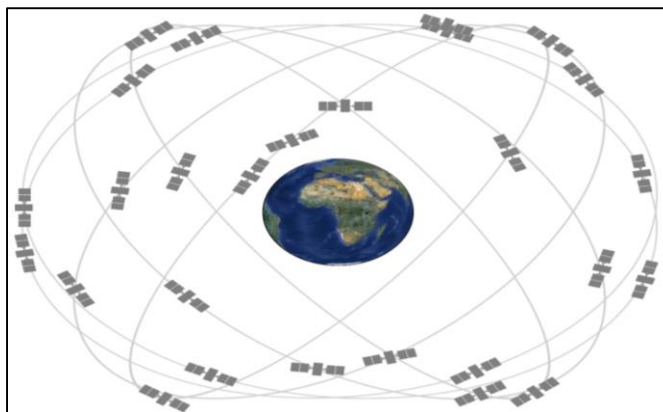
Actualmente según la página del Departamento de Seguridad de los Estados Unidos (<https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>) la constelación GPS tiene 31 satélites operativos, estos vuelan en órbita terrestre media (MEO) a una altitud

de aproximadamente 20.200km y cada satélite rodea la Tierra dos veces al día (Figura 7).

Esta constelación es una mezcla de satélites antiguos y nuevos, el Bloque IIA tiene satélites avanzados (segunda generación), el Bloque IIR satélites de reposición, el Bloque IIR-M satélites modernos y el Bloque IIF y IIF-M satélites de seguimiento (Department Of Defense USA, 2020).

Figura 7

Constelación GPS



Nota: Recuperado de Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, por Departamento de Defensa de Estados Unidos, 2020.

Señales de los satélites GPS (frecuencias)

La constelación GPS tiene cuatro bloques diferentes, todos estos bloques transmiten la señal L1C/A y la señal encriptada P(Y) en la L1/L2, estas son las más utilizadas. El segundo y tercer bloque también transmiten la señal civil L2C y solo el tercer

bloque transmite la señal aeronáutica L5, como se puede observar en la Tabla 2 (Li et al., 2018).

Tabla 2

Señales de los satélites GPS

Bloques	Señales	Satélites
IIR	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	8
IIR-M	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M	7
IIF	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M, L5	12
III/IIF	L1 C	4

Nota: Recuperado de Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo por Li et al., 2018, Journal of Geodesy.

Archivos RINEX y SINEX

RINEX

Receptor de Cambio Independiente (RINEX) es un formato de fichero de texto, que tiene como objetivo almacenar de manera estandarizada medidas proporcionadas por los sistemas de navegación. El archivo RINEX emplea: la medida de la portadora de fase en una o dos frecuencias, la medida de pseudo-rango y el tiempo obtenido en el instante de validar las medidas de fase y código (Orozco et al., 2020).

Los datos de las estaciones GNSS vienen dadas en archivos en formato RINEX, el directorio contiene observaciones (comprimido en Hatanaka) y archivos de navegación (GPS y GLONASS). Estos archivos RINEX no se modifican durante el procesamiento y se pueden descargar desde centros de datos internacionales (Dach et al., 2015).

Este formato considera en su estructura seis tipos de ficheros:

- a. Observación data
- b. Navigation data
- c. Meteorological data
- d. GLONASS Navigation Message
- e. GEO Navigation Message
- f. Satellite and Receiver Clock Data

Los archivos RINEX se encuentran conformados por un bloque de segmento de datos y una cabecera, para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se utilizó los archivos de Observación, por lo que a continuación se realizará una descripción de su estructura. En parte preliminar se presenta información sobre el software de compilación, datos técnicos de la antena, intervalo de rastreo, tiempos de observación y número de observaciones por satélite. En la sección de datos se puede encontrar, indagar sobre la época de rastreo, la cantidad de satélites observados y las señales de las portadoras captadas C1, P1, P2, L1, L2, D1, D2 .

Figura 8

Formato de archivo RINEX de observación GPS y GLONASS

```

2.10      OBSERVATION DATA   M (MIXED)      RINEX VERSION / TYPE
TPS2RIN 1.40      RUN BY          23-NOV-13 21:11  PGM / RUN BY / DATE
build Feb  4 2004 (c) Topcon Positioning Systems  COMMENT
Use -p (profile) switch to override ANTENNA TYPE and DELTA  COMMENT
and other fields                                          COMMENT
C:\2013\SAT Valpo 2013-2\04_Datos Red Estatica\20-11-13\hgfr  COMMENT
HGFR                                         MARKER NAME           nombre
OBSERVER          AGENCY          OBSERVER / AGENCY
SR1JCVQQTJ4      TPS HIPER          3.4 May,13,2009      receptor
HGFR1120t        TPSHIPER GGD          ANT # / TYPE         antena
1694774.0018 -5077344.7141 -3456715.8957  APPROX POSITION XYZ   posición aproximada
1.5050          0.0000          0.0000              ANTENNA: DELTA H/E/N altura de antena
1              1              WAVELENGTH FACT L1/2
2013  11  20  19  19  10.0000000  GPS      TIME OF FIRST OBS   fecha-hora
2013  11  20  20  20  45.0000000  GPS      TIME OF LAST OBS    inicio y fin
5.000          LEAP SECONDS
16             # OF SATELLITES
17             # / TYPES OF OBSERV
7  C1  P1  P2  L1  L2  D1  D2
G 2 389 242 242 389 242 387 242
G 4 740 740 740 740 740 740 740
G12 740 740 740 740 740 740 740
G15 740 740 740 740 740 740 740
G17 36  0  0  36  0  35  0
G24 740 740 740 740 740 740 740
G25 722 708 708 722 708 722 708
G26 413 413 413 413 413 413 413
G29 386 313 313 386 313 386 313
R 4 202 200 200 202 200 201 200
R 5 118 94 84 118 84 100 80
R13 499 498 498 499 498 497 497
R14 740 740 740 740 740 740 740
R15 610 606 540 610 540 610 540
R17 740 740 740 740 740 740 740
R18 443 437 437 443 437 429 429
R24 740 740 740 740 740 740 740
SE TPS 00000000 COMMENT
END OF HEADER
13 11 20 19 19 10.0000000 0 12G 2G 4G12G15G24G25G26R 4R13R14R17R24
24379938.954          128117459.101 5      observaciones
4184.789
24363266.969 24363266.2704 24363285.8374 128029829.486 6 99763515.60043
2831.444          2206.313
21610997.418 21610996.6394 21611007.6854 113566556.814 7 88493430.64245
2513.148          1958.313
21228306.524 21228305.9424 21228317.3694 111555488.922 8 86926367.35046
-805.045          -627.315
20796472.703 20796473.2994 20796484.8294 109286190.815 8 85158082.53046
2562.206          1996.518
24333596.317 24333597.4744 24333632.8244 127873968.579 4 99642027.03241

```

Nota: Recuperado de GEODESIA SATELITAL GNSS, por Zapata et al., 2015.

Tabla 3*Estructura de un archivo RINEX de observación*

Etiqueta de la cabecera	Detalle
	Versión de RINEX. / Tipo de fichero
	“O” observación
	“N” Navegación
RINEX VERSION / TYPE	Sistema de Satélite * G o vacío: GPS. * R: GLONASS. * T: NWSS Transit. * M: Mixto
PGM / RUN BY / DATE	Software utilizado en la generación del fichero / Agencia que crea este fichero / Día de creación del fichero.
COMMENT	Comentario
MARKER NAME	Nombre del punto de observación
MARKER NUMBER	Número del punto de observación
OBSERVER / AGENCY	Nombre del Observador / agencia o instituto que observa
REC # / TYPE / VERS	Número / tipo / software usado por el receptor
ANT # / TYPE	Número / tipo de la antena
APPROX POSITION XYZ	Posición absoluta aproximada del punto en la última época en X Y Z
ANTENNA: DELTA H/E/N	Altura de antena / excentricidades relativas al Este / al norte (m).

Etiqueta de la cabecera	Detalle
WAVELENGTH FACT L1/2	<p>Factores de para L1 y L2:</p> <ul style="list-style-type: none"> * 1: Ciclo enteros completo. * 2: Medio ciclo (encuadramiento). <p>* 0 en L2: Sólo una frecuencia (solo L1).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Número de satélites con estos factores. - Lista de PRNs satélites máximo 7 satélites, caso contrario repetir el registro. <p>Número de observables / tipos diferentes de observaciones</p> <p>Tipos de observaciones:</p> <p>L1,L2 : Fase medida para L1 y L2</p> <p>C1 : Pseudo distancia usando el código C/A en L1</p> <p>P1,P2 : Pseudo distancia usando en código P para L1 y L2</p> <p>D1, D2 : Frecuencia doppler en L1 y L2</p> <p>T1, T2 : Señal Doopler transit integrada 150 kHz (T1), 400Khz (T2)</p> <p>Unidades :</p> <p>Fase (ciclos enteros)</p> <p>Pseudo distancia (metros)</p> <p>Doopler (Hz) 62 Transit (ciclos)</p>
# / TYPES OF OBSERV	
INTERVAL	Intervalo de observación (épocas) en s

Etiqueta de la cabecera	Detalle
TIME OF FIRST OBS	<p>Tiempo de la primera época de grabación (4 dígitos para el año, mes, día, hora, minuto y segundo).</p> <p>Ej: 2020 3 24 13 10 36.000000</p> <p>Sistema de tiempo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • GPS: tiempo GPS • GLO: tiempo UTC.
TIME OF LAST OBS	Tiempo de la última época de grabación (4 dígitos para el año, mes, día, hora, minuto y segundo).
LEAP SECONDS	Salto de segundos entre épocas en segundos
PRN / # OF OBS	Pseudo – Rango – Noise (número del satélite) / número
END OF HEADER	de observaciones para cada tipo de observaciones indicadas en # / TYPES OF OBSERV. Para cada satélite se repite este registro.
END OF HEADER	Final de la cabecera

Nota: Recuperado de Primera propuesta para el archivo RINEX (Receiver Independent Exchange Format) por Palacios J., 2010.

SINEX

Solution INdependent Exchange Format (SINEX) fue diseñado para modular y manejar el GPS, cumpliendo con todos los requisitos de soluciones para SLR y VLBI, este

formato es utilizado para las soluciones semanales (Andrade, 2012). Los archivos SINEX deben contener las coordenadas calculadas en la solución, la matriz de varianza-covarianza correspondiente y todas las restricciones a priori utilizadas para el cálculo de la solución (SIRGAS, 2017).

Los archivos SINEX en su estructura poseen información de las soluciones diarias como semanales de las estaciones SIRGAS, que los centros de procesamiento de datos GNSS oficiales de SIRGAS ponen a disposición de manera semilibre (loosely constrained), en donde se puede encontrar la información estadística necesaria para obtener productos vigentes de acuerdo con el Marco de Referencia Terrestre Internacional actual, ya que se toma en cuenta al tiempo como cuarta componente; X,Y, Z, t (modelo de velocidades) (Cisneros, 2014).

Los archivos SINEX de cada semana GPS se encuentran disponibles en el FTP de SIRGAS, con la finalidad de ser descargados para su posterior uso. Su estructura está conformada por un encabezado de informativo, un detalle de la estrategia utilizada para la combinación de las soluciones individuales y los diversos bloques de fracciones de datos referentes a fichas técnicas de antenas y sus excentricidades, receptores, épocas y precisiones de las coordenadas de las estaciones SIRGAS.

Figura 9

Estructura de un archivo SINEX

```

1  %=SNX 2.01 XYZ 20:115:63585 IGS 20:075:00000 20:081:86370 P 01104 0 S
2  *-----
3  +FILE/REFERENCE
4  *INFO_TYPE          INFO
5  DESCRIPTION         Solution of the SIRGAS reference frame aligned to the IGb08
6  OUTPUT              SINEX FILE FROM ADDNEQ2
7  CONTACT             IGS RNAAC SIR - DGFI - sanchez@dgfi.badw.de
8  SOFTWARE            Bernese GNSS Software Version 5.2
9  HARDWARE            LINUX
10 INPUT              Loosely constrained weekly solutions from the SIRGAS PC
11 -FILE/REFERENCE
12 *-----
13 +FILE/COMMENT
14 The SIRGAS-CON network comprises a core network (SIRGAS-C) with continental
15 coverage and many densification networks (SIRGAS-N), which correspond to the
16 national reference frames. These networks are weekly processed by 9 analysis
17 centres, who deliver loosely constrained solutions for station positions in
18 SINEX format to be combined in a unified solution. Each SIRGAS-CON station is
19 processed by three Analysis Centres. (For more information see: www.sirgas.org)
20 This file contains the combination of the individual solutions, aligned to the
21 IGb08 frame.
22
23 Combination strategy
24 =====
25 1) Individual solutions are reviewed/corrected for possible format problems,
26    station inconsistencies, etc.
27 2) Constraints included in the delivered normal equations are removed.
28 3) Sub-networks are individually aligned to the IGS reference frame. Until
29    the GPS week 1631 (April 16, 2011), the IGS05 reference frame was used.
30    Between GPS weeks 1632 (April 17, 2011) and 1708 (October 6, 2012), the
31    IGS08 reference frame was used (see IGS messages [IGSMAIL-6354],
32    [IGSMAIL-6355], [IGSMAIL-6356]). Since GPS week 1709 (October 7, 2012),
33    the IGb08 reference frame is used (see [IGSMAIL-6663]). For this, 9
34    additional IGS reference stations were included in the SIRGAS core network.

```

Nota: Recuperado de <ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/2097> por Galárraga et. al., 2021.

El último particular enunciado anteriormente, fue utilizado para el desarrollo del presente proyecto de investigación, pudiendo ser encontrado en el bloque SOLUTION/ESTIMATE, este muestra los datos de cada estación con su respectivo código o denominación dispuesto en forma horizontal de acuerdo a sus componentes cartesianas (X, Y, Z), seguido por la época de rastreo y desviación estándar (precisión).

Figura 10

Bloque SOLUTION/ESTIMATE de un archivo SINEX

```

*-----*
+SOLUTION/ESTIMATE
*INDEX TYPE CODE PT SOLN REF EPOCH UNIT S ESTIMATED VALUE STD DEV
  1 STAX AACR A 1 20:078:43200 m 2 0.644009054822371E+06 .706795E-04
  2 STAY AACR A 1 20:078:43200 m 2 -.625106425851150E+07 .219881E-03
  3 STAZ AACR A 1 20:078:43200 m 2 0.109378095801293E+07 .715102E-04
  4 STAX ABCC A 1 20:078:43200 m 2 0.173943798746596E+07 .737179E-04
  5 STAY ABCC A 1 20:078:43200 m 2 -.611725244144934E+07 .158807E-03
  6 STAZ ABCC A 1 20:078:43200 m 2 0.515065111694732E+06 .469281E-04
  7 STAX ABMF A 1 20:078:43200 m 2 0.291978578998270E+07 .713287E-04
  8 STAY ABMF A 1 20:078:43200 m 2 -.538374496225257E+07 .119139E-03
  9 STAZ ABMF A 1 20:078:43200 m 2 0.177460486634178E+07 .542167E-04
 10 STAX ABPD A 1 20:078:43200 m 2 0.174298324676785E+07 .123251E-03
 11 STAY ABPD A 1 20:078:43200 m 2 -.611833150980271E+07 .212911E-03
 12 STAZ ABPD A 1 20:078:43200 m 2 0.494730758220755E+06 .572239E-04
 13 STAX ABPW A 1 20:078:43200 m 2 0.175350720185116E+07 .353157E-03
 14 STAY ABPW A 1 20:078:43200 m 2 -.611323904332910E+07 .605765E-03
 15 STAZ ABPW A 1 20:078:43200 m 2 0.518210623786897E+06 .132467E-03
 16 STAX AGCA A 1 20:078:43200 m 2 0.178254709878711E+07 .638037E-04
 17 STAY AGCA A 1 20:078:43200 m 2 -.605478793126171E+07 .144515E-03
 18 STAZ AGCA A 1 20:078:43200 m 2 0.916299575108597E+06 .446446E-04
 19 STAX AGGO A 1 20:078:43200 m 2 0.276512087742904E+07 .272899E-03
 20 STAY AGGO A 1 20:078:43200 m 2 -.444924840662589E+07 .356789E-03
 21 STAZ AGGO A 1 20:078:43200 m 2 -.362640368655760E+07 .310721E-03
 22 STAX ALAR A 1 20:078:43200 m 2 0.504372969210342E+07 .115421E-03
 23 STAY ALAR A 1 20:078:43200 m 2 -.375310563045844E+07 .959812E-04
 24 STAZ ALAR A 1 20:078:43200 m 2 -.107296680509886E+07 .464334E-04
 25 STAX ALBE A 1 20:078:43200 m 2 0.180673500083437E+07 .602472E-04
 26 STAY ALBE A 1 20:078:43200 m 2 -.605649317553233E+07 .133040E-03
 27 STAZ ALBE A 1 20:078:43200 m 2 0.855562580612216E+06 .436243E-04
 28 STAX ALEC A 1 20:078:43200 m 2 0.123323185521847E+07 .808165E-04
 29 STAY ALEC A 1 20:078:43200 m 2 -.625543559982177E+07 .241102E-03

```

Nota: Recuperado de <ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/2097> por Galárraga et. al., 2021.

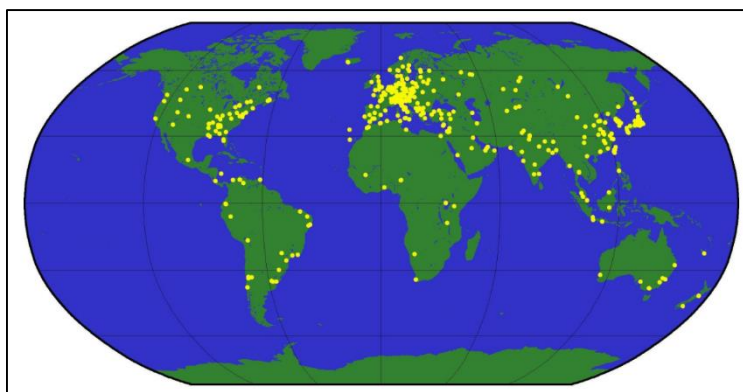
Software Bernese 5.2

El software GNSS Bernese es un software científico, que cumple con los más altos estándares de calidad para aplicaciones geodésicas y otras aplicaciones basadas en sistemas globales de navegación por satélite. Los GNSS (GPS y GLONASS) que actualmente se encuentran en pleno funcionamiento son compatibles con el sistema. El

software no está completamente desarrollado para el análisis de datos de doble frecuencia para los próximos sistemas nuevos, como el Galileo europeo, el chino BeiDou, o el sistema de satélites cuasi-zenith japonés QZSS. Más de 700 instituciones en el mundo usan el Software GNSS Bernese como se puede ver en la Figura 11. (Dach et al., 2015).

Figura 11

Distribución geográfica de las instituciones que usan el Software GNSS Bernese



Nota: Recuperado de Bernese GNSS Software, por Dach et al., 2015

La versión 5.2 del Software GNSS Bernese tiene un alto rendimiento, un paquete de post-procesamiento GPS / GLONASS (GNSS) de alta precisión y gran flexibilidad para muchas aplicaciones. Modelado de última generación, control detallado de todo el procesamiento, herramientas para la automatización, estándares internacionales actuales y un diseño altamente modular son características del Software GNSS Bernese (Dach et al., 2015).

El software GNSS Bernese consta de más de 450 000 líneas de código fuente en aproximadamente 1 500 módulos. El programa de menú actúa como interfaz de usuario

para la mayoría de los más de 100 programas. Consta de algunos componentes 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).

Software Gamit/Globk 10.7

Es un software científico de análisis GNSS que tiene como objetivo estimar las coordenadas de estaciones y velocidades, representaciones estocásticas o funcionales de deformación post-sísmica, retrasos atmosféricos, órbitas de satélites y parámetros de orientación de la Tierra (Herring et al., 2018).

GAMIT (GNSS en MIT) es un grupo de programas para procesar datos de fase con el fin de estimar posiciones relativas tridimensionales de estaciones terrestres y órbitas de satélites, parámetros de orientación de la Tierra y retrasos en el cenit atmosférico, este software puede ejecutarse en cualquier sistema operativo UNIX. Este software incorpora algoritmos de operador de diferencia que pueden mapear las fases de la portadora en fases simple y doble diferenciadas, también pueden extraer la información de posicionamiento de datos de fase independiente del número de datos (Herring et al., 2018).

GLOBK ("Filtro Kalman global") es un filtro Kalman que tiene como objetivo principal combinar algunas soluciones geodésicas como GPS, VLBI y experimentos SLR. Acepta como datos, o "cuasi-observaciones", las estimaciones y matrices de covarianza para las coordenadas de la estación, los parámetros de orientación de la Tierra, los parámetros orbitales y las posiciones de las fuentes generadas a partir del análisis de las

observaciones primarias. Las soluciones de entrada se realizan generalmente con incertidumbres sueltas a priori asignadas a todos los parámetros globales, de modo que las restricciones se pueden aplicar uniformemente en la solución combinada (Herring et al., 2018).

Ventajas del software científico frente al comercial

El software científico logra mejorar la precisión en la obtención de coordenadas finales del GPS, sin embargo, estos paquetes de programación son difícil de utilizar para los usuarios comunes del sistema GPS. Entre los principales softwares de carácter científico se tiene: Bernesse GNSS, multi-GNSS, GIPSY y GAMIT/GLOBK. Es importante considerar que se debe pagar una licencia para poder hacer uso de paquetes científicos (Jiménez et al., 2018).

El software comercial es de uso gratuito y amigable con el usuario, a continuación, se detallan algunos softwares comerciales: RTKLIB, Glab, Trimble RTX, Magic GNSS y Opus. Una desventaja es que estos programas pueden carecer de la precisión requerida (Jiménez et al., 2018).

Según el estudio Análisis comparativa de software y métodos de procesamiento GNSS para la obtención de posiciones y velocidades: aplicación al valle central de Costa Rica de Portela (2019), el software científico es más difícil de utilizar, se necesita un proceso de previo aprendizaje, y se demora mucho más tiempo que el software comercial, pero los resultados fueron más precisos.

Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME)

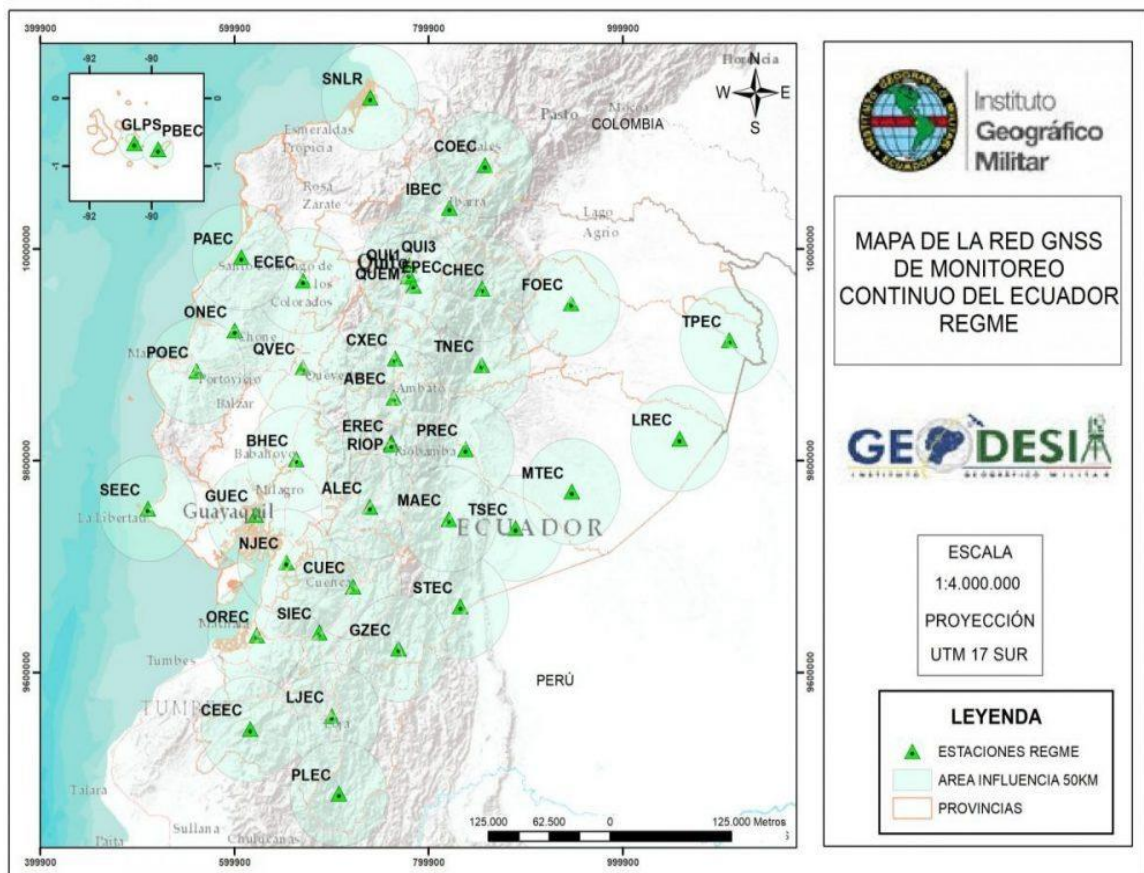
La REGME es una red de estaciones GNSS (GPS y GLONASS) de monitoreo continua que se encuentra enlazada a la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE) y a la Red Continental (SIRGAS-CON), estas estaciones se encuentran distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional (50km de cobertura por cada estación), logrando una cobertura del 95%, que captan datos GPS y GLONASS las 24 horas del día, los 365 días del año proporcionando la información necesaria a los usuarios (IGM, 2013).

Los productos que genera la REGME son archivos diarios de 24 horas en formato RINEX con un intervalo de grabación de 30 segundos y sus coordenadas correspondientes (IGS14) especificadas en las fichas técnicas que se encuentran en el Geoportal institucional y en la página web del Instituto Geográfico Militar (IGM) (Cisneros, 2013).

Actualmente según el visor de la Red GNSS del Ecuador en el geoportal del IGM existen 34 estaciones activas, 10 estaciones en mantenimiento y 16 estaciones removidas, las estaciones REGME se pueden ver en la Figura 12.

Figura 12

Mapa de la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador REGME



Nota: Recuperado del Geoportal IGM, 2021

Capítulo III

Metodología

Generalidades

A partir de los objetivos establecidos al inicio de la presente investigación, se definen dos etapas principales de trabajo: la primera referida al procesamiento de datos y materialización de coordenadas y el segundo al análisis de las soluciones. La etapa de procesamiento de datos y materialización de coordenadas incluyó:

- Obtención y control de los datos recolectados por las estaciones GNSS para monitoreo continuo pertenecientes a la REGME.
- Ajuste de las observaciones GNSS utilizando el método de mínimos cuadrados y método de filtro de Kalman.
- Materialización de las coordenadas semanales de las estaciones de monitoreo continuo en el sistema de referencia internacional IGS14, materializadas con las constelaciones GLONASS y GPS.

El procesamiento de datos y la obtención de coordenadas se realizó en el software científico Bernese 5.2 y en el software científico GAMIT/GLOBK 10.7., se procesaron los datos GNSS con las constelaciones satelitales GPS y GLONASS. La elección para estas plataformas se llevó a cabo en de acuerdo con la compatibilidad de modelos y algoritmos utilizados en la generación de soluciones en comparación con las soluciones generadas por SIRGAS.

En la segunda etapa correspondiente al análisis de soluciones, se validaron las soluciones y precisiones obtenidas con la ayuda de un análisis estadístico. El análisis de resultados incluyó los siguientes pasos principales: el análisis de soluciones posicionales

con el objetivo de evaluar la calidad de las soluciones obtenidas y la evaluación de la precisión de las soluciones a partir del análisis de las precisiones internas y externas de cada solución. En este sentido, los principales puntos a desarrollar fueron:

- Evaluación del modelo de procesamiento comparando soluciones semanales y soluciones SIRGAS (precisión externa).
- Valoración individual de las soluciones diarias mediante el análisis de su repetitividad (precisión interna).

Identificación de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del territorio ecuatoriano, con las siguientes quince estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME, como se muestra en la Figura 13.

Diseño de la red geodésica y elección del período de rastreo

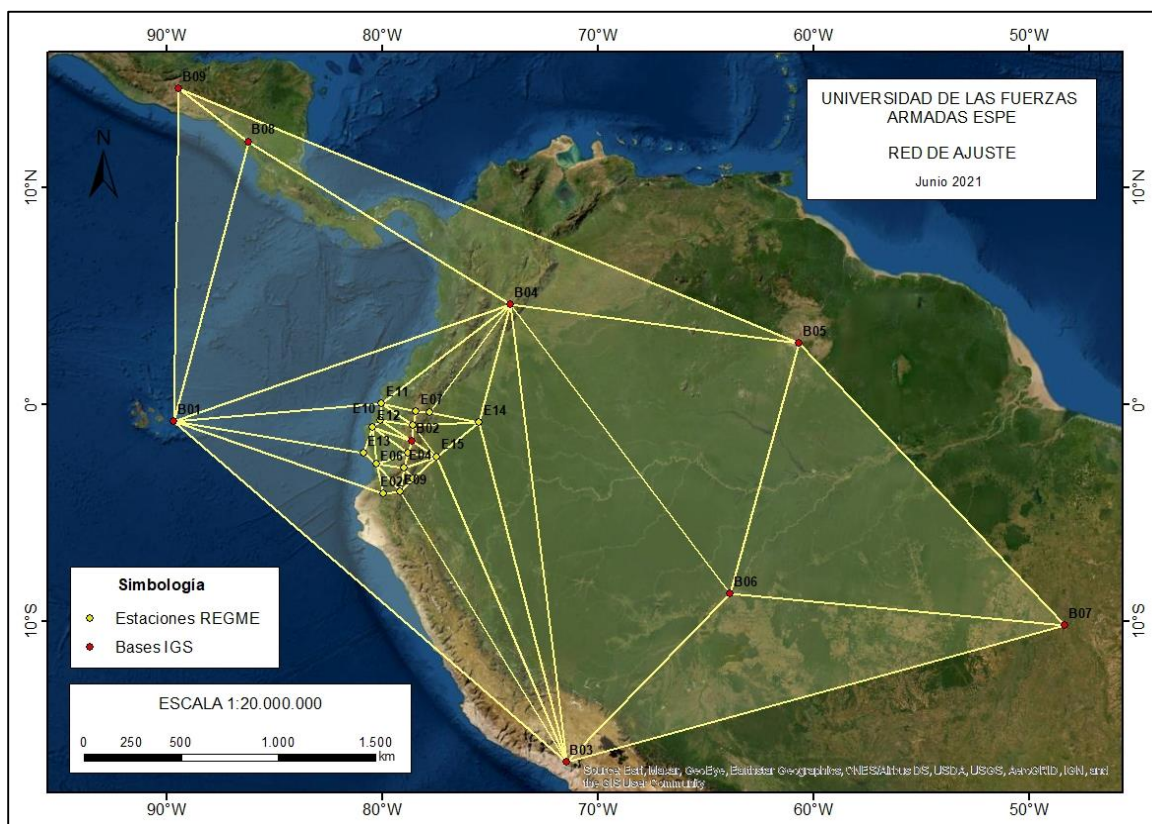
Para el diseño de la red geodésica se consideraron 15 de las estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME, se ha escogido este número de estaciones por el tema de disponibilidad de datos, se analizaron aquellas estaciones que durante el período de los meses de febrero – abril del 2020, es decir 91 días (13 semanas) de recopilación de información al menos hayan recolectado 75 días de datos. Adicional, el número de estaciones escogidas para su posterior procesamiento de datos se

restringió a 15 estaciones debido al tema de disponibilidad de equipos computacionales para el procesamiento en los softwares científicos y recurso tiempo.

Por otro lado, para la elección de las 15 estaciones se tomó en cuenta aquellas que por su ubicación geográfica permitieron cubrir la mayor parte del territorio ecuatoriano. El diseño de la red se realizó siguiendo las especificaciones geométricas de una red clásica, es decir, formando idealmente triángulos equiláteros entre cada estación de monitoreo continuo a ser seleccionada.

Figura 13

Red geodésica de ajuste



Nota. En la Figura se muestran las 15 estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME, seleccionadas para el presente proyecto de investigación.

Adicionalmente y dado que para el ajuste de la red geodésica en estudio se utilizan 9 estaciones GNSS pertenecientes a la Red IGS, las estaciones de estudio también involucran, de manera secundaria, a las que se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 4

Estaciones GNSS de la red geodésica en estudio y estaciones base para el ajuste

N°	Nombre	Ubicación	Red
1	ALEC	Alausí	SIRGAS / REGME
2	CEEC	Celica	SIRGAS / REGME
3	CHEC	El Chaco	SIRGAS / REGME
4	CUEC	Cuenca	SIRGAS / REGME
5	CXEC	Cotopaxi	SIRGAS / REGME
6	DPEC	Posorja	SIRGAS / REGME
7	EPEC	ESPE	SIRGAS / REGME
8	GZEC	Gualaquiza	SIRGAS / REGME
9	LJEC	Loja	SIRGAS / REGME
10	ONEC	Chone	SIRGAS / REGME
11	PAEC	Pedernales	SIRGAS / REGME
12	POEC	Portoviejo	SIRGAS / REGME
13	SEEC	Santa Elena	SIRGAS / REGME
14	TPEC	Tiputini	SIRGAS / REGME
15	TSEC	Taisha	SIRGAS / REGME
Estaciones base pertenecientes a la IGS			
1	GLPS	Galápagos	IGS / SIRGAS
2	RIOP	Riobamba	IGS / SIRGAS
3	AREQ	Arequipa	IGS / SIRGAS
4	BOGT	Bogotá	IGS / SIRGAS
5	BOAV	Boa Vista	IGS / SIRGAS
6	POVE	Porto Velho	IGS / SIRGAS

7	TOPL	Palmas	IGS / SIRGAS
8	MANA	Managua	IGS / SIRGAS
9	GUAT	Ciudad de Guatemala	IGS / SIRGAS

Nota. Esta tabla muestra la ubicación y a la red que pertenece cada estación GNSS en estudio, adicional se muestran las 9 estaciones bases necesarias para el ajuste de red.

Software Científico GAMIT/GLOBK 10.7

GAMIT/GLOBK forman un conjunto completo de programas para analizar mediciones GNSS principalmente para estudiar la deformación de la corteza. El software ha sido desarrollado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology), Scripps Institution of Oceanography y la Universidad de Harvard. GAMIT es una colección de programas para procesar datos de fase para estimar posiciones relativas tridimensionales de estaciones terrestres y órbitas de satélites, retrasos en el cenit atmosférico y parámetros de orientación de la Tierra. El software está diseñado para ejecutarse en cualquier sistema operativo UNIX.

GLOBK es un filtro de Kalman cuyo propósito principal es combinar varias soluciones geodésicas como GPS, VLBI y experimentos SLR. Acepta como datos, o cuasi-observaciones, las estimaciones y matrices de covarianza para las coordenadas de la estación, los parámetros de orientación de la Tierra, los parámetros orbitales y las posiciones de las fuentes generadas a partir del análisis de las observaciones primarias (Floyd, 2020).

Las soluciones de entrada se realizan generalmente con incertidumbres sueltas a priori asignadas a todos los parámetros globales, de modo que las restricciones se pueden aplicar uniformemente en la solución combinada. Para información acerca de la

instalación del software y los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento de este ver Anexo A y Anexo B.

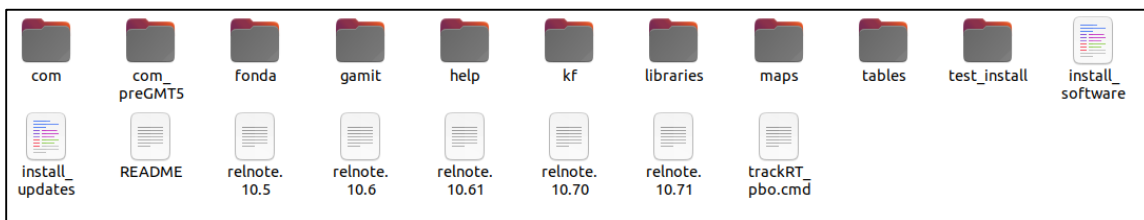
Estructura física y lógica del software

Para controlar el procesamiento, el software utiliza scripts de c-shell (almacenados en la carpeta “com” (ver Figura 14) y en su mayoría nombrados para comenzar con sh_) que invocan los programas Fortran o C compilados en los directorios “/gamit” y “/kf”. El software está diseñado para ejecutarse en cualquier sistema operativo UNIX.

La lógica de los parámetros permite un máximo de 99 sitios y la distribución estándar está dimensionada para 80 sitios, pero dado que la ejecución es proporcional al cubo del número de parámetros, con redes de más de 50 sitios se obtiene una mayor eficiencia mediante el procesamiento en paralelo utilizando subredes (T. Herring et al., 2018a).

Figura 14

Carpetas directorio de instalación del software GAMIT/GLOBK



Nota. En la Figura se muestran los directorios principales del software GAMIT/GLOBK.

Una de las ventajas del software GAMIT/GLOBK, es que se ahorra tiempo significativo en el procesamiento de grandes cantidades de datos mediante el procesamiento automático que realizan los módulos “sh_gamit” y “sh_glred”, mismos que son la base fundamental del procesamiento de soluciones en este software.

Procesamiento automático por lotes con los módulos sh_gamit y sh_glred

El módulo sh_gamit lleva, desde un solo comando, datos brutos o RINEX durante un rango de días hasta una solución y diagramas de datos de fase como un registro del análisis GAMIT, es decir este módulo determina y resuelve cada uno de los parámetros involucrados en la ecuación fundamental de procesamiento. El resultado final de este proceso, será la obtención de la matriz varianza-covarianza de parámetros incluida en el archivo de soluciones semilibre “h-file”.

El módulo sh_glred usa los resultados de GAMIT para producir series de tiempo de repetitividad diaria y un archivo de solución (h- o SINEX) que se puede combinar con los de otras épocas para estimar las velocidades de la estación. Los insumos necesarios para la inicialización de estos módulos son los archivos de control, mismos que se describen en los siguientes subtemas. Una vez estos sean configurados para una determinada campaña de procesamiento son comunes a todos los análisis de una época en particular. El otro insumo necesario es reunir los datos que no son IGS en uno o más directorios del sistema (T. A. Herring et al., 2018)

A continuación, en la Tabla 5 se presenta un resumen de cada una de las etapas ejecutadas por el software, así como, de los diferentes archivos y resultados obtenidos a lo largo del proceso.

Tabla 5*Carpetas directorio de instalación del software GAMIT/GLOBK*

	Nombre	Descripción	Archivos de entrada	Archivos de salida
Módulo automático sh_gamit	makexp/ makex	Preparación de la información	RINEX (or X-) files; station.info; session.info	D-file; K-file; X-file
	fixdvr	Configuración del control por lotes	D-file; sestbl.; sittbl.	B-file; I-file
	arc	Integración de órbitas satelitales	arc.bat; G-file	arcout.ddd; T-file
	model	Cálculo de derivadas parciales de fase respecto a los parámetros	L-file; station.info; X-file; I, J, T-files	C-file; P-file
	fixdvr	Corrección y eliminación de saltos de ciclo y outliers. Resolución de ambigüedades	T, J, L, X (or C) input	I-file (rcvr clock polynomials)
	solve	Estimación de parámetros (mínimos cuadrados). Creación de archivos h-file	C-file; M-file	Q-file; G-file; H-file; L-file
Módulo automático sh_glred	htoglb	Transformación de archivos binarios h-files a soluciones ASCII y/o SINEX	H-file	Soluciones ASCII y/o SINEX
	glred	Generación de soluciones separadas por cada solución ASCII y/o SINEX	C-file	Q-file G-file
	globk	Combinación de soluciones (GPS, VLBI y SLR) en una única solución	M-file N-file	H-file L-file

Nombre	Descripción	Archivos de entrada	Archivos de salida
glorg	Estimación de parámetros de transformación. Materialización de coordenadas (X, Y, Z, N, E, H)		

Nota. Adaptado de Herring, T., King, W., Floyd, A., McClusky, C., en GAMIT Reference Manual GPS Analysis at MIT, 2018.

Principales archivos generados por el software

Todos los módulos del programa se adhieren a convenciones específicas para la denominación de archivos. Esto asegura una gestión de archivos de datos única, facilita el procesamiento interactivo y la resolución de problemas. Hay cuatro tipos de archivos:

- Específico de la ocupación del sitio
- Específico de la sesión
- Global

A continuación, en la Tabla 6 se presentan a modo de resumen los archivos generados por el software.

Tabla 6

Principales archivos generados por GAMIT-GLOBK

Nombre	Descripción
A-file	Archivo ASCII de efemérides tabulares
B-file	Archivo de control (Batch mode)
C-file	Archivo de derivadas parciales

Nombre	Descripción
D-file	Archivo de sesiones
E-file	Archivo de efemérides broadcast
G-file	Archivo de parámetros iniciales. Orbitales satelitales
H-file	Archivo de resultados. Matriz de varianza-covarianza
I-file	Archivo de parámetros iniciales. Correcciones reloj - receptor
J-file	Archivo de parámetros iniciales. Correcciones reloj – satélite
K-file	Archivo de parámetros calculados. Offset del reloj - receptor
L-file	Archivo de coordenadas. Estaciones procesadas
M-file	Archivo de control. Edición y análisis de datos y parámetros
N-file	Archivo de pesos definidos para el ajuste de observaciones
O-file	Archivo de resumen. Análisis post-procesamiento
P-file	Archivo de resumen. Residuales
Q-file	Archivo de resumen. Líneas base y cálculo de variables
S-file	Archivo de control. Establecimiento de observables y errores
T-file	Archivo de efemérides tabulares
U-file	Archivo de modelos de carga y modelos meteorológicos
V-file	Archivo de resumen. Análisis de RMS
W-file	Archivo de observaciones. Información meteorológica
X-file	Archivo de observaciones. Información de fase y código
Y-file	Archivo de parámetros iniciales. Orientación del satélite
Z-file	Archivo de resultados. Información meteorológica

Nota. Recuperado de Herring, T., King, W., Floyd, A., McClusky, C., en GAMIT Reference Manual GPS Analysis at MIT, 2018.

Principales archivos de control a ser configurados

A continuación, se presentan los principales archivos de control que los módulos del software GAMIT/GLOBK emplea para la definición y establecimiento de carpetas,

modelos y módulos de corrección (modelos ionosféricos, troposféricos, de cargas oceánicas) a ser utilizados en el ajuste y posterior materialización de soluciones

En la Tabla 7, se definen algunas de las características de cada uno de estos archivos de control. Para el presente caso de estudio en el que se procesaron datos GNSS de la REGME del año 2020, se recomienda ver el Anexo B, en el cual se muestra la configuración realizada a estos archivos de control previo al procesamiento y materialización de soluciones.

Tabla 7

Archivos de configuración del software científico GAMIT-GLOBK

Nombre	Red
process.defaults	Archivo para especificar y configurar el entorno de cálculo, fuentes de datos internos y externos y archivos de órbita, hora de inicio e intervalo de muestreo, instrucciones para archivar los resultados y una dirección de correo electrónico para recibir un resumen de la ejecución.
sites.defaults	Archivo con la determinación de estaciones locales e IGS a ser usadas en el procesamiento y ajuste de soluciones, y cómo se manejarán los metadatos de cada estación. Adicional, mediante el módulo “sh_glred” permite especificar aquellas estaciones de las cuales se desea obtener automáticamente sus archivos de observación RINEX.

Nombre	Red
station.info	Contiene toda la información referente a las estaciones (receptores y antenas) utilizadas. Altura, tipo, códigos, nombres, versiones, entre otros.
apr-file (IGS14.apr)	Este archivo contiene las coordenadas cartesianas (posición y velocidad) de las estaciones que desea que no se modifiquen durante el procesamiento y ajuste de soluciones.
sestbl.	Configuración de archivos de control, parámetros y modelos de corrección utilizados en el ajuste de observaciones, a través del módulo sh_gamit.
sittbl.	Determinación de valores y pesos iniciales definidos para cada estación.

Nota. Esta tabla resume brevemente los principales archivos de control a ser configurados previo al procesamiento y posterior materialización de soluciones GNSS. Adaptado de Herring, T., King, W., Floyd, A., McClusky, C., en Introduction to GAMIT/GLOBK, 2018.

Software Científico Bernese 5.2

El software GNSS de Berna es un software científico de procesamiento de datos multi-GNSS de alta precisión desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB). Por ejemplo, es utilizado por CODE (Centro de Determinación de

Órbitas en Europa) para sus actividades internacionales (IGS) y europeas (EUREF / EPN) (European GNSS Service, 2018).

El Software GNSS de Berna está disponible en plataformas UNIX / Linux, Mac y Windows y se distribuye con una licencia GUI fácil de usar, un sistema de ayuda integrado basado en HTML, un manual de usuario extendido de aproximadamente 650 páginas y ejemplos de procesamiento listos para usar para diferentes aplicaciones:

- PPP (versiones básica y avanzada)
- RINEX a SINEX (procesamiento de red de doble diferencia)
- Determinación del reloj (procesamiento de red de diferencia cero)
- Determinación de órbita precisa LEO basada en datos GPS
- Validación SLR de órbitas GNSS o LEO

Para información acerca de la instalación del software y los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del mismo ver Anexo C.

Estructura del software Bernese

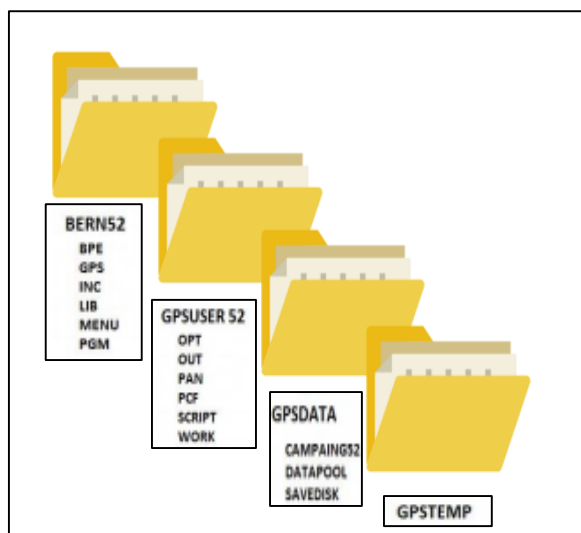
Para el procesamiento de datos GNSS, el software ofrece dos opciones: la primera de ellas es de forma manual, en la cual el usuario ejecuta cada rutina de procesamiento de manera secuencial, y la segunda mediante el motor de procesamiento de Bernese (BPE por sus siglas en inglés), misma que es una manera automatizada de realizar el procesamiento de datos, proceso en el cual se programa una rutina que cumpla un objetivo geodésico, con la finalidad de optimizar el tiempo sobre todo cuando se trabaja con miles de datos GNSS. Siendo esta la opción utilizada en el presente proyecto.

Como lo indica Sanchez (2013), el software Bernese 5.2 se compone de cuatro directorios principales, mismos que se describen a continuación y se muestran en la Figura 15:

- BERN52: en donde se encuentran librerías, archivos generales necesarios para el procesamiento, los ejecutables de cada script.
- GPSDATA: en este directorio se almacenan las campañas a procesar
- GPSUSER: el cual contiene información necesaria para el procesamiento automático
- GPSTEMP: es el directorio en donde se almacenan los archivos temporales para el BPE (proceso automático) (Sanchez, 2013).

Figura 15

Directorio del Software Bernese



Nota. En la figura se muestran los directorios que conforman el software Bernese 5.2

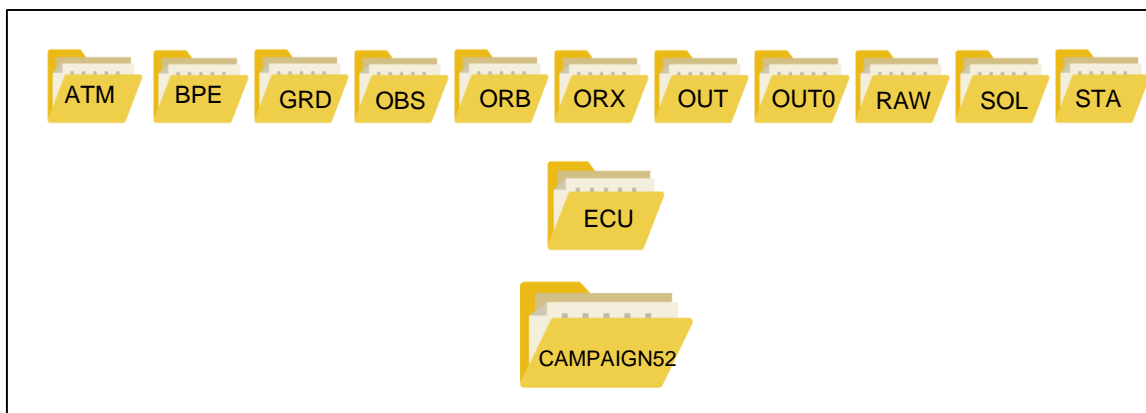
Preparación de archivos de entrada para el procesamiento

Dentro del directorio BERN50/GPS, se encuentran los archivos generales necesarios para el correcto procesamiento de los datos GNSS, que una vez definidos servirán para todas las campañas de procesamiento. Dentro de estos archivos se tienen los siguientes: receptores, efemérides, satélites, antenas, modelos de nutación, entre otros, estos archivos pueden ser descargados de la página web del software Bernese.

Adicional a los archivos generales, de acuerdo a cada campaña se deben modificar los archivos de entrada, que se encuentran almacenados en la carpeta CAMPAING en el directorio GPSDATA, cabe mencionar que dentro de este directorio se encuentra la subcarpeta de la campaña a ser procesada. Dentro de la carpeta CAMPAING se encuentran once directorios que se muestran en la Figura 16, en estos directorios se colocan los archivos de entrada que servirán de insumo principal para la realización del procesamiento de datos GNSS.

Figura 16

Directorio de campañas del Software Bernese



Nota. En la figura se muestra los directorios de las campañas a modificar

Principales directorios de cada campaña a procesar

El procesamiento dentro del programa se da en campañas que se crean acorde a la necesidad del usuario, pero mantienen siempre la misma estructura interna de un grupo de carpetas que servirán como destino para los insumos necesarios, así como para los resultados del procesamiento almacenados en el directorio SAVEDISK. En la Tabla 8, que se presenta a continuación, se describe brevemente el contenido de cada directorio, los archivos de entrada que debe contener cada uno y donde obtener dichos archivos.

Tabla 8

Principales directorios de una campaña de procesamiento

Directorio	Contenido	Donde obtener datos
ATM	Modelos ionosféricos de entrada (.ION)	Los modelos ionosféricos diarios se obtienen de: ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/
BPE	Contiene los archivos que se generan en el modo Automático	Durante el procesamiento
GRD	Mallas globales diarias con los coeficientes de entrada para la <i>Vienna Mapping Function</i> (VMF)	Se obtienen de: http://gqosatm.hq.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/ Como ellas están distribuidas a intervalos de 6 horas, por cada día deben bajarse 4 archivos más el primero del siguiente día: $yyyy = \text{año}, mm = \text{mes}, dd = \text{día del mes}$
OBS	Mediciones en formato Bernese.	Durante el procesamiento
ORB	Contiene archivos de órbita .PRE, archivos de reloj .CLK, y de diferencia de código .DCB, así	En este directorio deben copiarse los archivos con las efemérides satelitales

Directorio	Contenido	Donde obtener datos
	como archivos .IEP, .PRE y .TAB, obtenidos al finalizar el procesamiento.	precisas y los parámetros de orientación terrestre del IGS. Se obtienen de cualquier banco de datos del IGS ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/pr oduct/
OBX	Contiene los archivos RINEX descartados por el software.	Durante el procesamiento
OUT	Reportes de cálculo del preanálisis, solución diaria y solución semanal.	Durante el procesamiento
OUT0	Reportes de cálculo de la preparación y preprocesamiento.	Durante el procesamiento
RAW	Contiene los archivos RINEX de cada estación de Monitoreo continuo. (Archivos de observación).	Se obtienen de los bancos de datos del IGS y de SIRGAS.
SOL	Contiene los archivos (.SNX) de las soluciones de coordenadas. (Archivos de salida).	Durante el procesamiento
STA	Contiene archivos .ABB, .ATL, .BLQ, .CLU, .CRD, .PLD, .STA, .VEL, SESSIONS.SES (default para todas las campañas) y archivos .CRD de resultados	Los archivos .BLQ, .ATL y .STA se obtienen en ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/DGF/BERN52_SIR/

Directorio	Contenido	Donde obtener datos
obtenidos al finalizar el procesamiento.		Para los archivos .CRD existen archivos ya generados, que se pueden descargar del ftp://ftp.unibe.ch.aiub/BSWU/SER50/STA Archivo SESSIONS.SES se genera automáticamente cuando se crea la campaña.

Nota. En los directorios BPE, OBS, ORX, OUT, OUT0 y SOL no se debe colocar ningún archivo de entrada, puesto que estas carpetas sirven para los archivos que se generan durante el procesamiento. Adaptado de Sanchez, L., en Instructivo para la instalación y configuración del Bernese GNSS Software V. 5.2., 2013.

Consideraciones para los archivos de entrada

Las siguientes consideraciones que se muestran en la Tabla 9, corresponden a los archivos de entrada que el software Bernese lee para un correcto procesamiento.

Tabla 9*Principales consideraciones para los archivos de entrada*

Nº	Consideraciones
1	Los nombres y extensiones de los archivos de entrada se deben encontrar con letra mayúscula.
2	Para los archivos de la carpeta .GRD se debe unificar los archivos antes mencionados en uno diario con extensión .GRD; se lo puede realizar a través de la ventana del CMD utilizando el siguiente comando: Copy VMFG_YYYYMMDD.H00 + VMFG_YYYYMMDD.H06 + VMFG_YYYYMMDD.H12 + VMFG_YYYYMMDD.H18 + VMFG_YYYYMM(dd+1).H00 VMFwww?.GRD
3	El nombre de los archivos de salida debe estar en mayúsculas, iniciar con VMF e identificarse con la semana y el día de la semana: VMFYYYY?.GRD, por ejemplo VMF17500.GRD, VMF17501.GRD
4	En la carpeta ORB se debe colocar un archivo diario con las órbitas con el nombre IGSwww?.SP3 y uno semanal con los parámetros de orientación terrestre IGSwww7.ERP. El archivo .ERP debe ser cambiado a la extensión .IEP, para que el software pueda realizar el procesamiento.
5	Los siete archivos principales para el inicio del procesamiento de datos GNSS se encuentran dentro de la carpeta "STA". Los archivos .CRD, .VEL y .ABB deben ser configurados adecuadamente, considerando principalmente que se debe incluir las

estaciones GNSS a ser utilizadas, esto ayudará a evitar errores en el procesamiento.

Nota. Consideraciones archivos de entrada. Adaptado de López & Negrete, en Obtención de coordenadas precisas de estaciones de monitoreo continuo y simulación sísmica para detección de movimientos rápidos, 2016.

Procesamiento de datos GNSS

Una vez analizada la forma de funcionamiento de los softwares científicos que se emplearon en el presente trabajo de investigación, se presenta a continuación los diagramas de flujo para el procesamiento de datos GNSS de la REGME, adicional la edición de datos necesarios como insumo para el procesamiento.

Intervalo de procesamiento

El intervalo de observación para la descarga de datos son archivos RINEX con 30 segundos de observación de datos.

Flujogramas de procesamiento

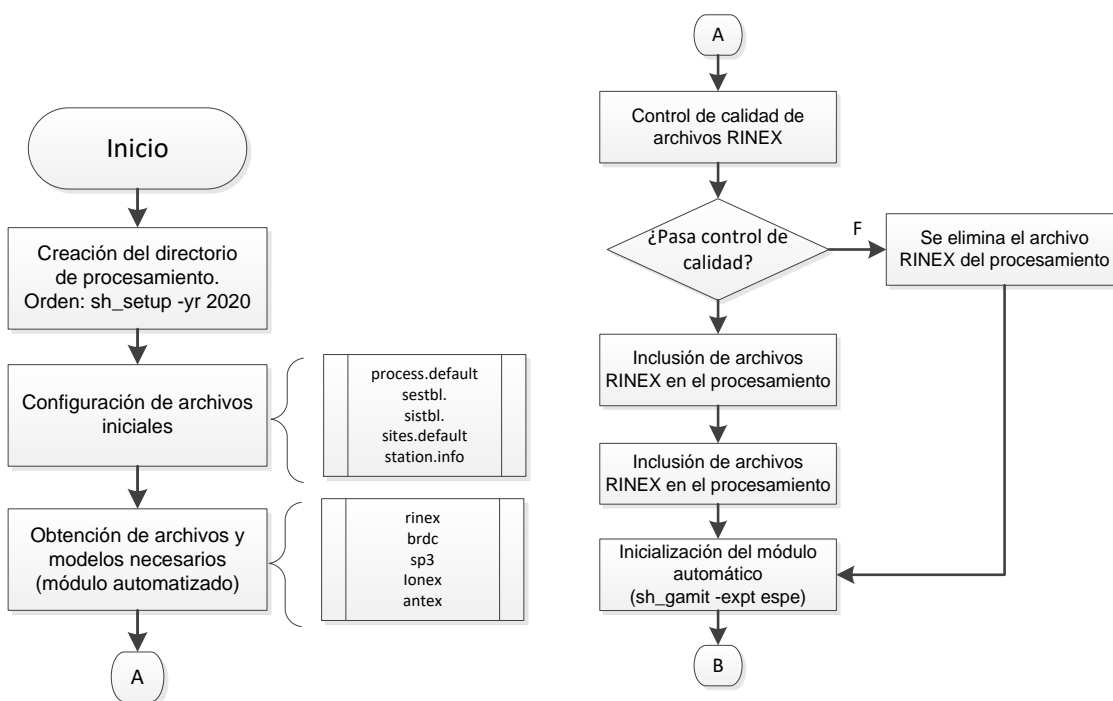
El procesamiento de datos en este estudio se basa en las pautas establecidas en la Guía para centros de análisis SIRGAS (Sanchez, 2017). Es importante señalar que

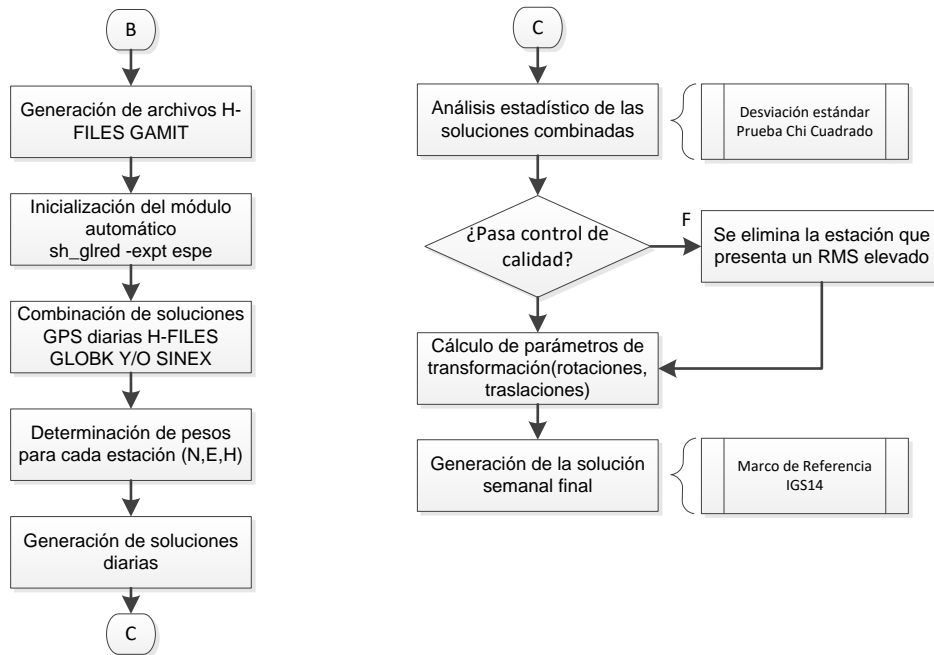
dado que los datos orbitales y de reloj originales generados por IGS tienen sus logros en el sistema de referencia para el período de estudio IGB14.

Los esquemas fundamentales de procesamiento de datos y materialización de coordenadas utilizado en esta investigación se muestran a continuación.

Software GAMIT/GLOBK 10.7

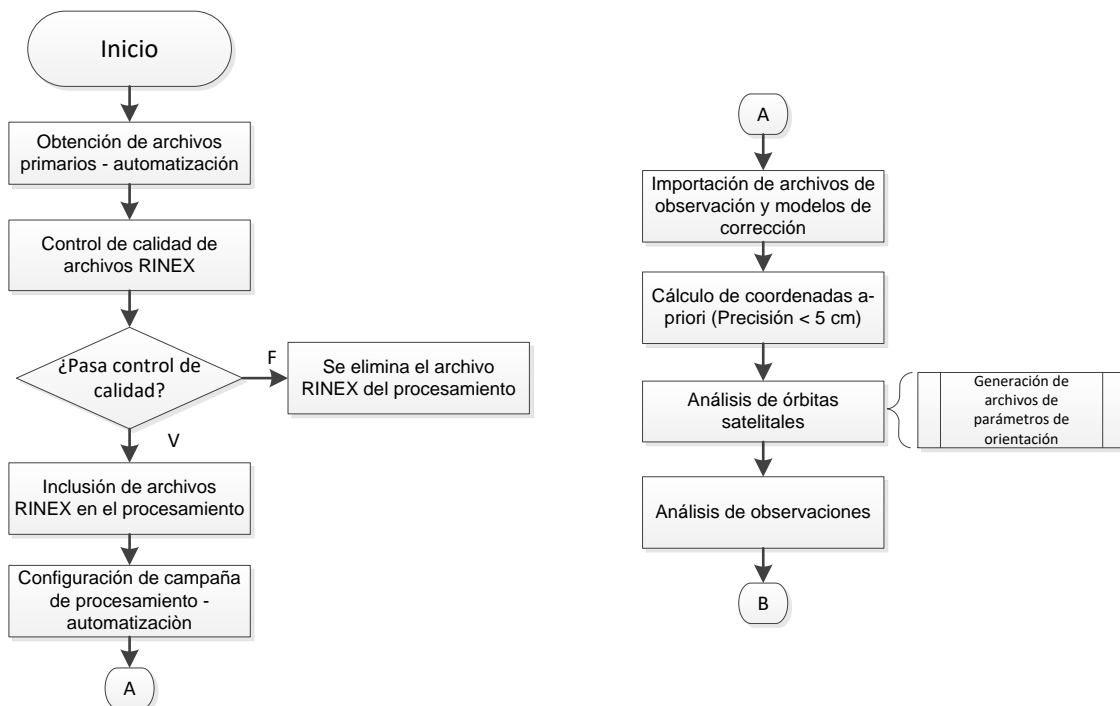
A continuación, se presenta el diagrama de flujo, el cual resume el procedimiento realizado para el procesamiento de datos GNSS en el software científico GAMIT/GLOBK 10.7.

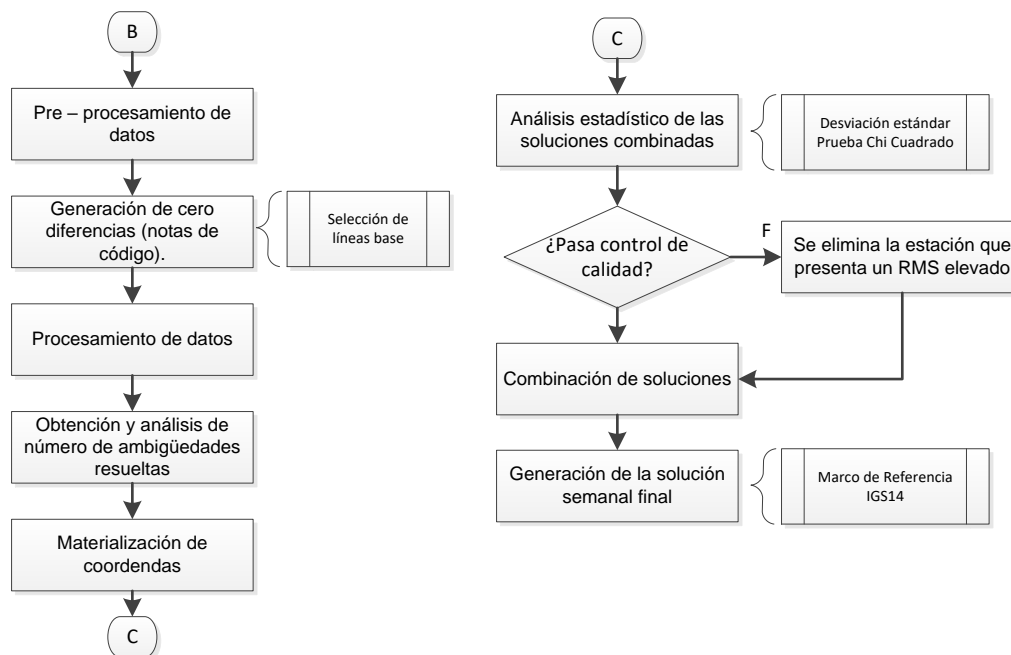




Software Bernese 5.2

A continuación, se presenta el diagrama de flujo, el cual resume el procedimiento realizado para el procesamiento de datos GNSS en el software científico Bernese 5.2.





Recopilación y tratamiento de archivos RINEX

Una vez definidas las estaciones de monitoreo continuo de la REGME a ser procesadas, el intervalo de observación y el periodo de análisis, se procedió a recopilar los archivos crudos (.T02), mismos que fueron obtenidos directamente en el Instituto Geográfico Militar. Se obtuvieron un total de 1365 archivos .T02, debido a que se seleccionaron 15 estaciones de monitoreo continuo durante un periodo de rastreo de 90 días (13 semanas).

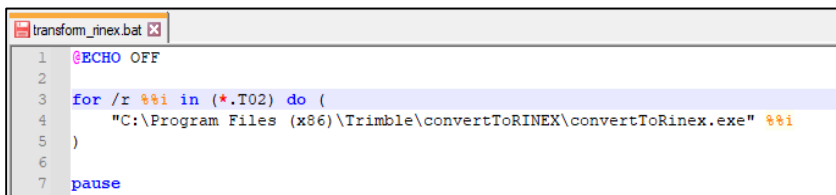
Transformación de archivos .T02 a archivos de observación (.O)

Para la conversión de los archivos en formato Trimble .T02 a .O que son los observables con los que se trabajó, primero se recopiló la información por día de procesamiento en este caso se tuvieron 91 carpetas, una por cada día de datos, dentro de éstas estaban contenidos los 15 archivos .T02 correspondientes a cada una de las estaciones de monitoreo continuo seleccionadas para el presente proyecto. Para la mencionada conversión se utilizó el software Convert to Rinex de Trimble.

Cabe mencionar que la conversión de los archivos no se realizó mediante la interfaz gráfica que ofrece el software Convert to Rinex, en su lugar se utilizó un archivo formato .bat (transform_rinex.bat), mismo que se copió dentro de cada carpeta de las 91 mencionadas, y se lo hizo ejecutable mediante el script que se muestra en la Figura 17. Esto ayudó a automatizar la conversión de archivos de formato .T02 a .O.

Figura 17

Archivo .bat que hace ejecutable el software Convert to Rinex.



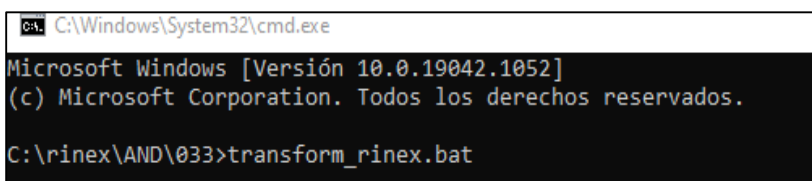
```
1 @ECHO OFF
2
3 for /r %%i in (*.T02) do (
4     "C:\Program Files (x86)\Trimble\convertToRINEX\convertToRinex.exe" %%i
5 )
6
7 pause
```

Nota. En la figura se muestra el archivo .bat, mismo que se abre con Notepad++ para su edición, dentro de este se indica la dirección de donde se instaló el software Convert to Rinex.

Este archivo se ejecuta desde una consola de Windows (CMD), que debe ser direccionada a la carpeta donde se encuentran los archivos .T02., como se muestra en la Figura 18. Se recomienda que los archivos .T02 se copien en una carpeta del disco local C.

Figura 18

CMD de Windows con la orden para ejecutar el archivo .bat



```
C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 10.0.19042.1052]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\rinex\AND\033>transform_rinex.bat
```

Nota. En la figura se muestra el archivo la orden con la que se ejecuta el archivo .bat, únicamente se debe copiar el nombre “transform_rinex.bat” y presionar enter, esta ventana de comandos se debe abrir en la carpeta con los archivos .T02 y el archivo .bat

Una vez ejecutado el script, los archivos .T02 se convierten en seis archivos que son .o (archivo de observación), .c (datos del reloj de satélite y receptor), .g (archivo de navegación GLONASS), .h (datos meteorológicos), .l (mensaje de navegación GEO), .n (archivo de navegación), cada extensión de archivo contiene información de las diferentes constelaciones satelitales, para el presente proyecto se trabajó con el formato .o, que es el archivo de observables de cada estación seleccionada.

Procesamiento en el software GAMIT/GLOBK 10.7

A continuación, se presentan los archivos de configuración y posteriores resultados correspondientes a la semana de procesamiento GPS 2091, equivalente a la primera semana de procesamiento escogido durante el periodo previamente definido, comprenden los días 03, 04, 05, 06, 07, 08 y 09 de febrero del 2020.

Establecimiento de parámetros de procesamiento y modelos de corrección

A continuación, se resumen los más importantes parámetros y modelos de corrección utilizados en el análisis y ajuste de observaciones para la semana GPS 2091. Estos parámetros que se muestran en la Tabla 10, para más información sobre la configuración de los archivos de control a se recomienda ver el Anexo B. Estos parámetros se obtienen de los archivos .sestbl y .sittbl.

Tabla 10

Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección

Parámetro	Valor	Descripción
Tipo de experimento	BASELINE	No determina parámetros orbitales
Tipo de análisis	1-ITER	Obtención de una solución preliminar y una solución final

Parámetro	Valor	Descripción
Tipo de observable	LC_AUTCLN	Para la determinación de ambigüedades utiliza la combinación L3.
Restricción ionosférica	0.0 m+8.00 ppm	Restricción aplicada a la variable ionosférica en la resolución de ambigüedades WL (L2 – L1).
Ambigüedades NL	0.15 .015 1000. 99. 15000.	Parámetros. Función de decisión, máximo valor de error (!!), máxima distancia línea base
Retraso cenital	YES	Estimación de parámetros de retraso cenital (zenith delay).
Número de retrasos cenitales	13	Número de retrasos cenitales calculados por día.
Intervalos de retrasos	2 horas	Intervalo en horas para la determinación del retraso cenital.
Modelo cenital	PWL	Determinación del modelo de retraso cenital: Piecewise linear.
Restricción retraso cenital	0.50 m	Precisión a priori inicial para la determinación de los retardos cenitales.
Variación cenital	0.02 100.	Valores de correlación para la variación cenital (Gauss-Markov)

Parámetro	Valor	Descripción
Gradientes atmosféricos	YES	Estimación de gradientes atmosféricos. (N-S y E-W)
Número de gradientes estimados	2	Número de gradientes calculados por día.
Restricción de gradiente	0.01	Precisión a priori inicial para la determinación de gradientes.
Modelo meteorológico	RNX GPT 50	Determinación del archivo y/o modelo meteorológico.
Modelo ionosférico	GMAP	Corrección ionosférica a través del modelo CODE.
Función de mapeo	NMF	Cálculo de los valores de mapeo troposférico húmedo y seco a través del modelo de Niell.
Marco inercial	J2000	Época de referencia para la transformación de marcos.
Modelo de radiación solar	BERNE	Determinación del modelo de radiación solar (9 coeficientes)
Sistema gravitacional	EGM08	Definición del modelo dinámico gravitacional para la integración inicial de órbitas. (Constantes)

Parámetro	Valor	Descripción
Antenas del receptor	AZEL	Corrección de la variación del centro de fase en función del ángulo de elevación y el azimut.
Antenas de los satélites	ELEV	Corrección de la variación del centro de fase en función del ángulo de elevación.
Cargamento atmosférico	ATMDISP_CM	Corrección de la variación posicional debido al cargamento por presión atmosférica.
Cargamento oceánico	FES2004	Corrección de la variación posicional debido al cargamento oceánico.
Ángulo de elevación	3°	Definición de la máscara de elevación utilizada en el posicionamiento.
Pesos iniciales (constraint) por estación	5 cm	Peso estándar para puntos de 1er orden.

Nota. Los parámetros mostrados en la tabla, corresponden al archivo sestbl.

Inicialización del módulo sh_gamit

En el software GAMIT/GLOBK el ajuste de observaciones es realizado mediante el primer módulo “sh_gamit”, el cual para su correcta ejecución se necesita configurar los

principales archivos de control que se muestran en la Tabla 7, mismos que se deben pegar en la carpeta “tables”, estos se configuran de acuerdo a las necesidades del usuario y a los datos GNSS que se vayan a procesar, para mayor información de la configuración de los archivos de control se muestra en el Anexo B.

Para ejecutar el módulo “sh_gamit”, se lo realizó mediante la siguiente orden introducida en la terminal dentro de la semana a ser procesada. Debido a que en el presente proyecto se procesaron las constelaciones satelitales GPS y GLONASS las respectivas órdenes se muestran a continuación.

GPS

```
sh_gamit -expt XXX -gnss G -s YYYY DOY1 DOY2 -pres ELEV -orbit SSS -copt x k p -  
dopts c ao >& sh_gamit_2130G.log
```

GLONASS

```
sh_gamit -expt XXX -gnss R -s YYYY DOY1 DOY2 -pres ELEV -orbit SSS -copt x k p -  
dopts c ao >& sh_gamit_2130R.log
```

Donde:

XXXX: nombre del proyecto.

gnss G: indica la constelación a ser procesada. G=GPS; R=GLONASS; E=GALILEO;
C=BEIDOU.

YYY: año calendario de la observación.

DOY1 y DOY2: primer y último día de la semana de observación.

ELEV: instrucción para la creación de gráfica de residuales.

SSS: tipo de órbita a utilizar; efemérides; igsf: final, igsr: rápida, igsu: ultra rápida. La opción "igs" son los centros de procesamiento, los posibles son: COD, MIT, JPL. Para el caso GPS se utilizó la orden "igsf", para la constelación GLONASS se utilizó la orden "codm", correspondiente a las efemérides finales del Centro de Determinación de Órbitas en Europa.

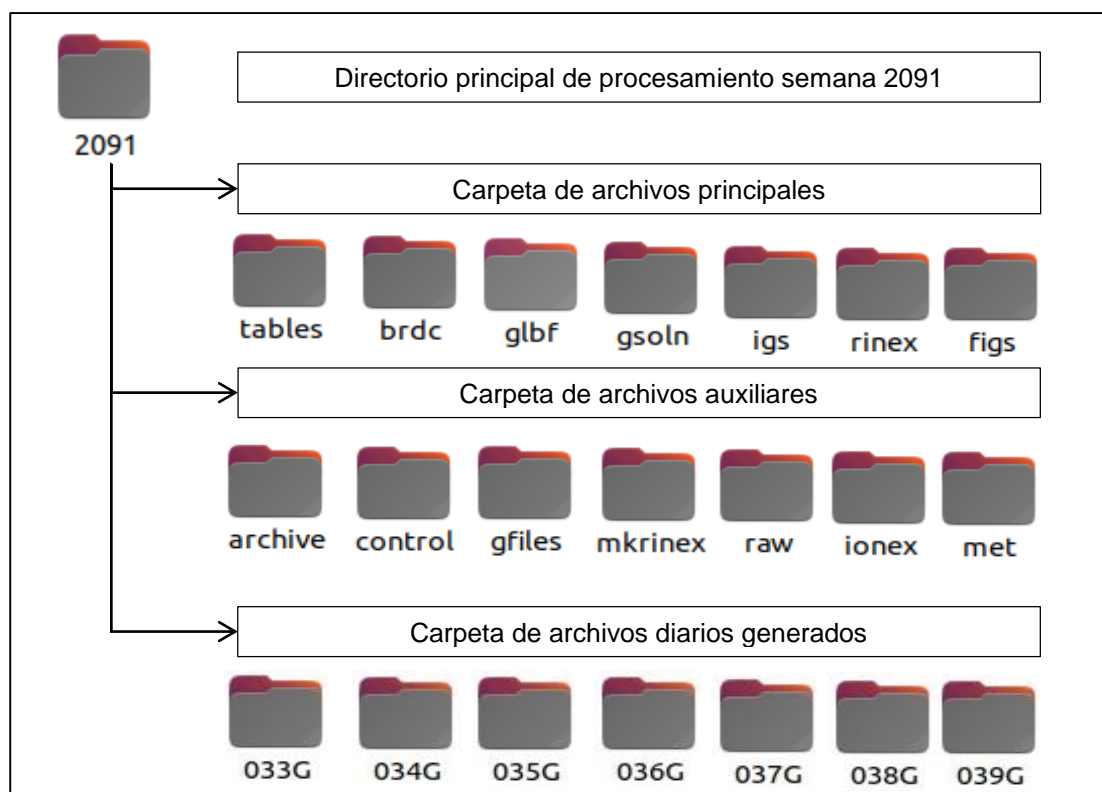
-copt x k p: permite comprimir ciertos tipos de archivos para que el procesamiento no ocupe tanta memoria.

>&: redirecciona la salida del terminal a archivo.log, para el caso GPS "sh_gamit_2020G" & para el caso de GLONASS "sh_gamit_2020R".

El resultado final de la ejecución del módulo "sh_gamit", es la obtención de los diferentes archivos de resultados que previamente fueron mostrados en la Tabla 6, es importante mencionar que en carpeta "gifs" se muestran las gráficas de residuales y en la carpeta "DOY" se almacenan los resúmenes estadísticos generados para cada día procesado, un esquema general de los resultados obtenidos y de las carpetas generadas una vez ejecutada la orden previa se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Principales carpetas creadas por el módulo *sh_gamit*



Nota. Dentro de la carpeta “tables” se deben colocar los principales archivos de control previamente mencionados. Adicional en la Figura se muestra la carpeta de archivos diarios generados correspondiente a la constelación GPS, con la constelación GLONASS únicamente cambia la letra “G” por la letra “R”.

Previo a la ejecución del segundo módulo “*sh_glred*”, que permite materializar las soluciones, es importante realizar un detenido estudio de los archivos de salida principalmente de los archivos “*autcln.post.sum*”, estos archivos se encuentran dentro de cada carpeta de archivos diarios generados, y su estructura se muestra en la Figura 20. La Figura 21 corresponde al mismo archivo, pero para la constelación GLONASS.

Figura 20

Archivo autcln.post.sum, día 033 semana GPS 2091, constelación GPS

```

83 ONE-WAY POSTFIT RESIDUAL STATISTICS: Pass 16
84 -----
85 RMS by site and satellite (mm): Pass 16
86 RMS IT Site All 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
87 RMS 16 ALEC 6.9 7 5 8 5 8 5 6 7 6 7 7 10 0 8 0 7 7 0 7 5 5 7 7 7 6 7 8 6 9 4 6 7
88 RMS 16 AREQ 8.0 11 10 6 7 7 7 5 8 7 7 9 7 10 10 6 7 9 5 9 7 8 7 6 11 9 8 8 6 8 6 8 9
89 RMS 16 BOAV 8.9 8 9 12 9 8 8 7 9 8 9 9 10 6 9 7 10 8 0 7 8 10 9 9 7 7 9 9 8 9 8 10 12
90 RMS 16 BOGT 9.7 9 8 14 11 8 10 10 11 10 8 9 11 7 10 7 8 10 7 10 8 6 13 10 7 9 8 12 6 8 7 13 11
91 RMS 16 CEEC 11.3 11 12 12 12 9 11 9 9 10 10 10 14 9 12 10 14 0 15 9 9 10 10 13 13 10 11 10 11 9 14 13
92 RMS 16 CHEC 7.0 9 6 7 6 6 7 7 6 7 7 7 6 6 9 5 7 7 0 7 7 5 6 6 6 8 7 7 8 7 6 5 9 9
93 RMS 16 CUEC 8.5 9 9 7 8 7 11 8 7 10 8 7 8 8 10 8 6 10 0 11 9 7 8 8 9 8 8 8 8 8 9 11 8
94 RMS 16 CXEC 8.0 9 6 8 7 8 12 10 8 9 7 6 8 6 9 6 7 7 0 7 7 6 9 6 7 7 8 9 7 6 6 13 7
95 RMS 16 DPEC 9.8 10 9 9 8 8 9 9 7 11 9 7 13 8 10 9 9 10 0 9 11 9 9 7 10 9 10 9 10 10 8 16 11
96 RMS 16 EPEC 8.3 13 7 9 8 6 9 8 8 9 6 8 9 7 9 6 8 9 0 8 9 7 9 9 7 7 9 9 7 8 6 11 6
97 RMS 16 GLPS 6.5 7 6 6 8 6 5 6 7 6 6 6 6 6 6 8 7 6 6 5 8 8 4 7 7 6 6 7 6 6 5 4 8 8
98 RMS 16 GZEC 11.4 12 11 13 10 11 13 12 11 12 11 10 12 10 12 9 10 12 0 12 10 10 11 10 12 11 10 10 10 10 16 14
99 RMS 16 LJEC 8.6 8 9 10 7 8 8 8 6 13 8 7 11 7 8 7 7 10 0 9 7 7 8 7 9 9 7 8 10 9 8 9 8
100 RMS 16 ONEC 8.2 11 8 8 7 7 10 8 7 11 5 7 8 8 7 6 9 9 0 9 9 6 9 7 8 7 7 9 10 6 6 10 8
101 RMS 16 PAEC 10.4 12 8 9 12 8 12 11 10 11 8 10 10 11 10 13 8 0 8 11 10 9 10 13 10 12 11 8 11 8 16 10
102 RMS 16 POEC 7.1 10 6 8 6 6 7 6 7 7 7 8 6 7 8 5 7 7 0 6 8 8 8 6 8 6 6 7 7 7 6 7 8
103 RMS 16 SEEC 8.4 10 8 7 7 8 8 8 8 8 9 8 7 8 9 9 7 8 8 0 7 9 7 8 7 12 8 8 8 7 7 6 13 8
104 RMS 16 TOPL 12.5 10 12 12 9 15 12 8 14 11 10 12 15 10 14 12 13 10 0 10 13 16 13 10 14 13 14 15 9 13 10 17 13
105 RMS 16 TPEC 9.5 9 8 9 8 10 10 8 9 10 8 9 13 8 8 9 6 11 8 0 8 9 9 10 9 8 11 9 11 8 11 8 14 10
106 RMS 16 TSEC 12.9 17 9 13 13 10 15 11 11 13 10 15 10 9 16 8 14 12 0 13 8 9 14 12 12 12 16 11 9 10 9 24 12
107 RMS 16 ALL 9.3 83 85 95 87 88 101 85 88 98 81 89 97 81 101 77 90 91 55 93 88 83 94 84 98 90 93 93 82 89 76 131 97
    
```

Nota. El valor encerrado en el círculo rojo, corresponde al RMS total para el ajuste del día 033 de la semana GPS 2091, con la constelación satelital GPS.

Figura 21

Archivo autcln.post.sum, día 033 semana GPS 2091, constelación GLONASS

```

72 ONE-WAY POSTFIT RESIDUAL STATISTICS: Pass 22
73 -----
74 RMS by site and satellite (mm): Pass 22
75 RMS IT Site All 01 02 03 04 05 07 08 09 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
76 RMS 22 ALEC 7.3 9 0 0 9 8 7 8 8 6 6 7 6 6 7 8 6 8 9 7 6 8
77 RMS 22 AREQ 7.8 7 8 9 7 8 6 8 9 5 10 9 5 5 7 6 12 9 7 7 8 7
78 RMS 22 BOAV 9.8 7 9 9 10 11 9 7 14 9 10 8 8 8 11 8 13 12 10 7 10 8
79 RMS 22 BOGT 10.2 7 12 10 10 11 13 8 11 9 13 10 7 9 10 8 11 12 10 8 10 10
80 RMS 22 CEEC 11.2 10 11 13 13 11 13 9 12 10 12 14 10 10 10 9 12 9 11 9 12 14
81 RMS 22 CHEC 7.1 6 5 8 6 8 8 7 10 6 6 7 6 5 6 6 7 8 8 6 7 5
82 RMS 22 CUEC 8.6 7 8 9 10 7 8 8 9 9 10 9 9 8 9 8 8 9 8 8 9 10
83 RMS 22 CXEC 7.6 7 7 9 8 7 8 7 10 6 7 9 7 6 7 6 6 7 8 6 9 8
84 RMS 22 DPEC 10.3 8 8 12 10 8 11 9 11 9 10 13 10 9 10 10 12 11 8 10 11
85 RMS 22 EPEC 8.5 6 6 9 9 8 9 10 12 5 7 8 7 6 7 6 7 10 10 10 9 8
86 RMS 22 GLPS 6.0 4 5 6 0 8 7 0 7 5 4 0 7 6 6 5 6 0 0 5 5 7
87 RMS 22 GZEC 10.5 8 9 12 13 9 11 11 12 10 9 11 11 8 8 8 10 11 9 9 10 13
88 RMS 22 LJEC 9.0 7 7 11 8 8 9 8 8 9 8 11 8 8 8 8 8 11 9 6 12 9
89 RMS 22 ONEC 8.0 6 6 7 7 6 8 9 12 7 8 7 6 5 7 4 6 7 9 8 9 10
90 RMS 22 PAEC 9.3 7 8 10 11 8 9 8 12 6 6 10 9 6 9 8 8 12 12 8 8 10
91 RMS 22 POEC 7.4 7 6 7 9 6 8 7 8 6 6 8 7 6 6 6 6 9 8 7 7 8
92 RMS 22 SEEC 8.2 7 7 8 11 7 9 7 9 7 7 8 8 6 8 6 7 9 10 6 8 11
93 RMS 22 TOPL 14.8 12 17 13 14 20 12 9 10 10 15 17 20 14 15 14 19 24 11 12 14 10
94 RMS 22 TPEC 11.2 9 9 9 14 11 12 9 14 8 10 11 11 9 12 7 14 15 12 9 11 9
95 RMS 22 TSEC 12.1 8 10 13 16 10 13 12 14 8 10 8 10 8 12 8 10 16 15 12 12 12
96 RMS 22 ALL 9.5 74 88 99 106 95 97 86 109 77 94 99 91 76 93 79 104 115 99 81 96 97
    
```

Nota. El valor encerrado en el círculo rojo, corresponde al RMS total para el ajuste del día 033 de la semana GPS 2091, con la constelación satelital GLONASS.

Dentro de la carpeta de cada día de archivos diarios generados se encuentra el archivo de resumen “sh_gamit.summary” y dentro de la carpeta figs los archivos de residuales “elev_res.png” y “res.png”, estos son los principales documentos de resumen a ser considerados para el análisis de los requerimientos mínimos necesarios para la inclusión o exclusión de una estación GNSS, previo a la inicialización del módulo “sh_glred”.

A continuación, se presenta un resumen de los archivos previamente mencionados, estos insumos corresponden a la estación “CEEC” perteneciente a la REGME, del día 033G de la semana GPS 2091. Se seleccionó esta estación debido a que presenta un RMS de 11.3 siendo uno de los RMS más elevados para ese día de procesamiento, esto con la constelación satelital GPS.

Para el procesamiento con la constelación satelital GLONASS y de acuerdo a la Figura 21, la estación que presenta un RMS más elevado es la estación GNSS “TSEC” perteneciente a la REGME. Estas estaciones serán las seleccionadas para ejemplificar la metodología empleada en el análisis de resultados.

Finalmente es importante mencionar que para el análisis de resultados únicamente se considerarán aquellas estaciones pertenecientes a la REGME, más no aquellas que fueron empleadas como estaciones base.

Análisis de resultados

Como se mencionó previamente el archivo “autcln.post.sum”, nos permite analizar el RMS total por día de procesamiento y el RMS de cada estación procesada, sin embargo, una de las maneras más fáciles de evaluar la consistencia del procesamiento realizado es a partir del uso del archivo de resumen “sh_gamit.summary” (ver Figura 22), el cual se crea individualmente para cada día de procesamiento y se lo encuentra en la carpeta de archivos diarios generados.

Figura 22

Archivo *sh_gamit_033G.summary*, día 033 semana GPS 2091, constelación GPS

```

1
2 Input options -expt espe -gnss G -s 2020 033 033 -pres ELEV -orbit igsf -copt x k p -dopts c ao
3
4 Processing 2020 033 GPS week 2091 0 Using node: karla-VirtualBox Started at: 21_06_24_09:42:38
5
6 Processing directory: /home/karla/tesis/GPS/2091/033G
7 Disk Usage: 222220 Free 63277.7 Mbyte. Used 78%
8
9 Number of stations used 20 Total xfiles 20
10
11 Postfit RMS rms, total and by satellite
12 RMS IT Site All 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
13 RMS 16 ALL 9.3 103 85 95 87 88 101 85 88 98 81 89 97 81 101 77 90 91 55 93 88 83 94 84 98 90 93 93 82 89 76 131 97
14 Best and Worst two sites:
15 RMS 16 GLPS 6.5 7 6 6 8 6 5 6 7 6 6 6 6 6 8 7 6 6 5 8 8 4 7 7 6 6 7 6 6 5 4 8 8
16 RMS 16 ALEC 6.9 7 5 8 5 8 5 6 7 6 7 7 10 0 8 0 7 7 0 7 5 5 7 7 7 6 7 8 6 9 4 6 7
17 RMS 16 TOPL 12.5 10 12 12 9 15 12 8 14 11 10 12 15 10 14 12 13 10 0 10 13 16 13 10 14 13 14 15 9 13 10 17 13
18 RMS 16 TSEC 12.9 17 9 13 13 10 15 11 11 13 10 15 10 9 16 8 14 12 0 13 8 9 14 12 12 12 16 11 9 10 9 24 12
19
20 Double difference statistics
21 Prefit nrms: 0.18850E+01 Postfit nrms: 0.18444E+00
22 Prefit nrms: 0.18803E+01 Postfit nrms: 0.18916E+00
23 Prefit nrms: 0.18850E+01 Postfit nrms: 0.18441E+00
24 Prefit nrms: 0.18803E+01 Postfit nrms: 0.18913E+00
25 Number of double differences: 110184
26
27 Phase ambiguities (Total WL-fixed NL-fixed): 570 546 544 AUTCLN (Total Expected) 570 570
28 Phase ambiguities WL fixed 95.8% NL fixed 95.4%
29
30 WARNING: 2 SITES have over constrained aproiri coordinates
31 qespep.033: GCR APTOL AREQ GEOC LAT -0.120
32 qespep.033: GCR APTOL AREQ GEOC LONG -0.221
33
34 Processing 2020 033 GPS week 2091 0 Using node: karla-VirtualBox Finished at: 21_06_24_10:09:09
35

```

Nota. Este archivo resume al archivo “autcln.post.sum” y sus características se muestran a continuación, la estructura y contenido es la misma para las constelaciones tanto GPS como GLONASS.

Este archivo dentro de su contenido presenta la siguiente información (T. Herring et al., 2018b):

1. El número de archivos de observación utilizados en el proceso.
2. Sitios excluidos del procesamiento.
3. Error medio cuadrático del ajuste total y por satélite.
4. Error medio cuadrático del ajuste por estación y por satélite (2 mejores/2 peores)
5. Error medio cuadrático de dobles diferencias. (Pre y post-ajuste)
6. Número total de ambigüedades de fase calculadas.
7. Porcentaje final de ambigüedades WL y NL resueltas.

Análisis de parámetros estadísticos en el archivo sh_gamit.summary

Para la inclusión o exclusión de una solución, este estudio se basa en los parámetros establecidos en el manual de procesamiento básico “Introduction to GAMIT/GLOBK” (T. Herring et al., 2018b). Algunos de los principales aspectos a ser considerados se tienen los siguientes:

1. El número de estaciones procesadas, siempre deberá ser igual al número de estaciones iniciales.
2. El RMS total para el ajuste y/o por estación deberá estar entre 10 y 15 milímetros para ser calificado como “aceptable”.
3. El RMS total para el ajuste y/o por estación deberá ser mayor a 15 milímetros para ser calificado como “malo”.

4. Dobles Diferencias con RMS (Posfit nrms) menores a 10 veces su valor inicial (Prefit nrms) son considerados “buenos”; cualquier otro valor superior a esta relación se considera “malo”.
5. El porcentaje de ambigüedades resueltas debe estar sobre la media (50%) para ser consideradas “buenas”, caso contrario se considera “malas”.

Como se evidencia en el archivo “sh_gamit.summary”, presenta un resumen estadístico de algunos parámetros a ser considerados y analizados previos a la materialización de soluciones con el módulo “sh_glred”. De ser el caso de que alguna de las estaciones supere un RMS de 15 milímetros, se debe emplear el archivo “autcln.post.sum”, en el cual se deberá identificar aquellas estaciones GNSS con este valor de RMS, y como lo indica Pilapanta (2013):

En caso de que el error total del ajuste o más del 50% de las estaciones posean un RMS calificado como “malo”, la solución deberá ser reprocesada (posterior a la identificación de la fuente de error, a través del análisis de residuales y archivos de resultados) o a su vez eliminada del procesamiento” (p.86)

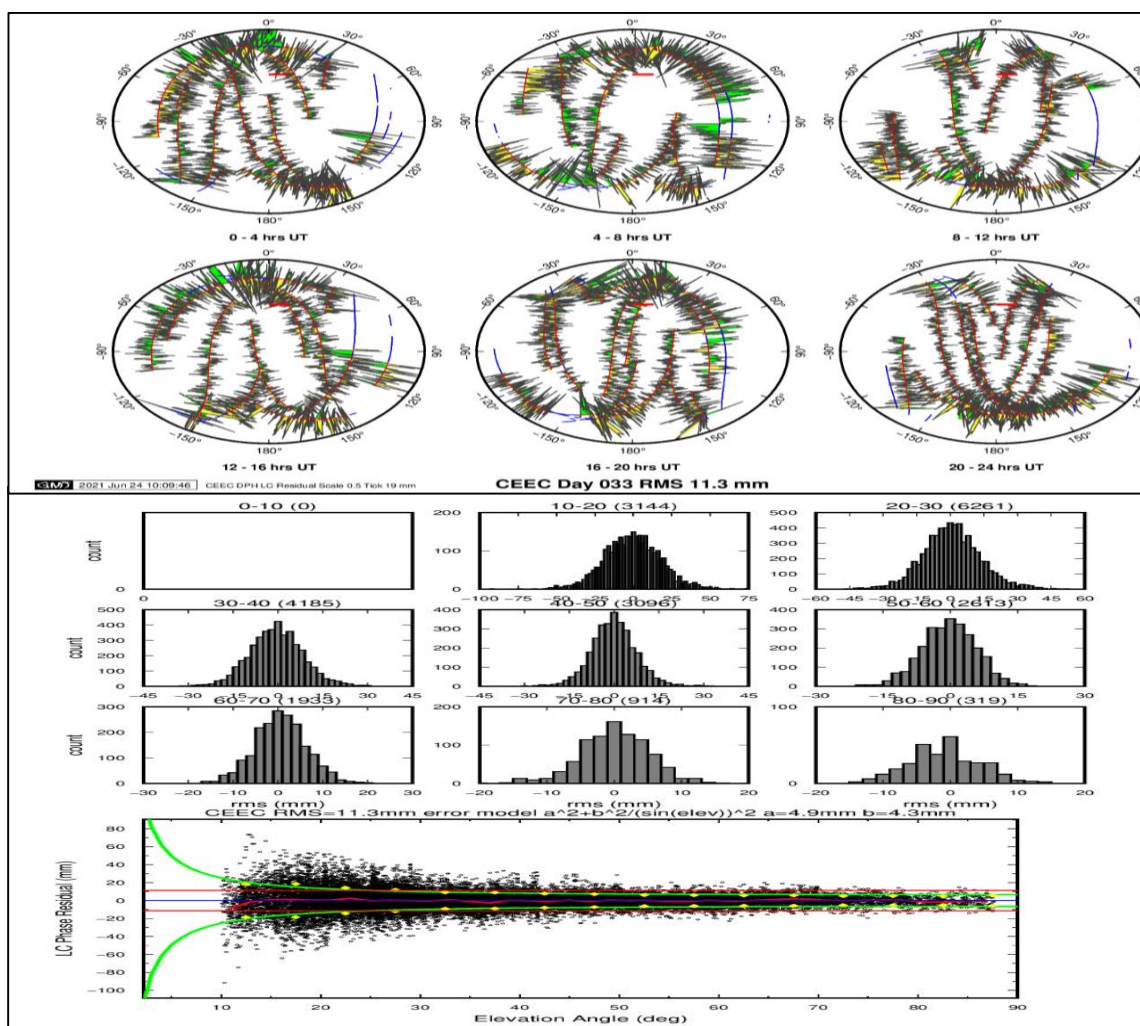
Análisis de residuales, archivos “elev_res.png” y “res.png”

El análisis de los archivos “elev_res.png” y “res.png”, nos permiten identificar aquellas posibles causas por la cual una estación GNSS presenta un RMS “aceptable” o “malo”, así mismo el análisis de estos archivos nos ayudó a determinar si una estación es apta para su posterior uso en la materialización de coordenadas. A continuación, en la Figura 23 se presentan los archivos mencionados para la estación “CEEC” y procesada

con la constelación GPS. Par el caso de la constelación GLONASS, estos archivos mantienen la misma estructura.

Figura 23

Gráficas de residuales CEEC.033.jpg y CEEC.033_elev_res.jpg



Nota. Archivos “elev_res.png” y “res.png”, correspondientes a la estación “CEEC”, procesada con la constelación GPS. La interpretación de estos gráficos se muestra a continuación.

Según el manual “Introduction to GAMIT/GLOBK” (T. Herring et al., 2018b), indica que una estación es o no apta para su posterior materialización, con el módulo “sh_glred”, si sus gráficas de residuales cumplen con los siguientes términos:

1. Para identificar la presencia de multipath (fuentes de interferencia) al momento de la observación, se lo hace mediante la presencia de elevados residuales en el mismo lugar y a diferentes tiempos.
2. La presencia de vapor de agua, se determina con altos residuales en diferentes lugares, ángulo de elevación, y a distintos tiempos.
3. Cuando la dispersión sigue los límites de color verde que se muestran en la Figura 23, indica la generación de un patrón normal de residuales. Esto se traduce en una buena consistencia de la estación de monitoreo continuo.
4. Cuando la dispersión tiende a sesgarse hacia un lado en particular, indica la generación de un patrón tendencial de residuales. Esto se traduce en que puede existir la presencia de fuentes de error al momento de la observación.

Inicialización del módulo sh_glred

Ejecutado el módulo “sh_gamit”, lo siguiente es ejecutar el módulo “sh_glred”, el cual permite combinar y materializar las soluciones semilibres incluidas en los diversos archivos h-file (SINEX), estos se generan por cada semana de estudio. A continuación, se presenta la orden (script) que se utiliza para ejecutar este proceso:

```
sh_glred -expt XXXX -s YYY DOY1 YYY DOY2 -opt R H G T -ncomb 7 -netext G R E C
```

Ejemplo con la semana 033 – 039 con la constelación GPS:

```
"sh_glred -expt espe -s 2020 033 2020 039 -opt G -ncomb 7 -netext G -globkcmd_prefix  
COMB >& sh_glred_comb.org"
```

Donde:

XXXX: nombre del proyecto.

YYY: año calendario de la observación

DOY1 - DOY2: primer y último día de observación.

opt H: instrucción para la generación de archivos H (SINEX)

opt G: instrucción para la materialización de coordenadas.

opt E: instrucción para la creación de series temporales.

ncomb 7: días que se van a combinar para materializar la solución, se materializó soluciones semanales por eso el número 7.

netext G R E C: indica la constelación con la que se va a materializar la solución, en el caso del ejemplo G = GPS, R = GLONASS, E = GALILEO y C = BEIDOU.

El resultado de la ejecución de este proceso, es un archivo de nombre "globk_espe_YYDOY1_DOY2.org". El contenido de este archivo se muestra en la Figura 24, allí se encuentra el conjunto de coordenadas materializadas en el marco de referencia que se predefine en el archivo de control "glorg_com.cmd".

Figura 24

Archivo globk_espe_20033_20039

```

+++++
+ GLOG Version 5.20 +
+++++

COMOPT: Line starting with COMB will be interpreted

Stabilisation with 20.0% constant, 80.0% site dependent weighting.
Delete sites with 3.0-sigma condition.
Height variance factor 10.00 Position, 10.00 Velocity
For Position: Min dH sigma 0.0050 m; Min RMS 0.0030 m, Min dNE sigma 0.00050 m
For Velocity: Min dH sigma 0.0050 m/yr; Min RMS 0.0030 m/yr, Min dNE sigma 0.00010 m/yr
Sigma Ratio to allow use: Position 3.00 Velocity 3.00

=====
Starting Position stabilisation iteration 1 L2002021200_espeG.glx
For 3 sites in origin, min/max height sigma 961.45 962.11 mm; Median 961.64 mm, Tol 15.00 mm L2002021200_espeG.glx

Position system stabilisation results
-----
X Rotation (mas) -0.35208 +- 0.14576 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
Y Rotation (mas) -0.56636 +- 0.39693 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
Z Rotation (mas) -1.41175 +- 0.29368 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
X Translation (m) 0.06438 +- 0.00885 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
Y Translation (m) -0.01646 +- 0.00318 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
Z Translation (m) 0.00620 +- 0.01248 Iter 1 L2002021200_espeG.glx
Condition Sigmas used 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
Sites and relative sigmas used in stabilisation
BOAV_GPS 1.00 AREQ_9PS 1.00 GLPS_4PS 1.00
For 9 Position Iter 1 Pre RMS 0.0109 m; Post RMS 0.00114 m L2002021200_espeG.glx
For 3 sites in origin, min/max NE sigma 1.10 1.36 mm; Median 1.27 mm, Tol 1.50 mm L2002021200_espeG.glx

SUMMARY POSITION ESTIMATES FROM GLOBK Ver 5.24
Long. Lat. dE adj. dN adj. dE +- dN +- RHO dH adj. dH +- SITE
(deg) (deg) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm)
311.66932 -10.17105 1.73 -2.08 2.29 1.38 0.011 -32.42 5.36 TOPL_4PS
299.29888 2.84518 2.45 0.63 0.99 0.84 0.862 4.66 2.15 BOAV_GPS+
296.10368 -8.70933 -1.12 0.07 1.40 0.96 -0.081 -19.92 4.38 POVE_2PS
288.50720 -16.46552 -1.39 0.70 0.34 0.88 -0.381 -1.88 1.66 AREQ_9PS+
285.91906 4.64007 -1.88 -0.20 1.08 1.20 -0.097 10.56 4.67 BOGT_4PS
284.47295 -0.78977 0.24 -2.30 0.84 0.80 -0.188 -6.72 3.09 TPFC_GPS
282.49748 -2.38132 1.82 -2.87 1.05 0.87 -0.188 -4.87 3.71 TSEC_GPS
282.18556 -0.33927 0.42 -3.61 0.86 0.78 -0.342 -8.05 2.96 CHEC_GPS
281.55368 -0.31489 -119.71 14.66 0.92 0.82 -0.348 -1.54 3.14 EPEC_GPS
281.41893 -3.40119 -33.16 7.21 1.16 0.91 -0.171 22.83 3.96 GZEC_GPS
281.38516 -0.93522 -78.31 36.16 0.91 0.78 -0.352 6.93 3.03 CXEC_GPS
281.15259 -2.20215 -40.34 12.39 1.04 0.77 -0.295 7.47 3.42 ALEC_GPS
280.99750 -2.88330 -29.77 6.63 0.94 0.71 -0.284 2.95 3.07 CUEC_GPS
280.80146 -3.98826 -26.06 -5.17 0.98 0.71 -0.217 7.08 3.15 LJEC_GPS
280.04455 -4.10092 0.79 0.02 1.37 0.98 -0.061 -1.96 4.84 CEEC_GPS
279.95836 0.07242 0.43 -1.14 1.05 0.90 -0.374 -14.73 3.47 PAEC_GPS
279.89849 -0.69735 -0.06 -4.58 1.04 0.86 -0.363 -6.88 3.30 ONEC_GPS
279.69831 -2.71398 -0.10 -3.43 1.03 0.76 -0.295 -0.94 3.14 DPEC_GPS
279.54585 -1.04376 2.94 -4.77 1.02 0.79 -0.350 -10.49 3.19 POEC_GPS
279.09601 -2.21963 0.89 -1.00 1.03 0.74 -0.351 -2.58 3.10 SEEC_GPS
269.69633 -0.74300 -0.72 -2.05 1.36 0.65 -0.757 1.12 2.61 GLPS_4PS+

POS STATISTICS: For 3 RefSites WRMS ENU 1.15 1.35 2.83 mm NRMS ENU 2.12 1.77 1.39 L2002021200_espeG.glx
POS MEANS: For 3 RefSites: East -0.97 +- 0.66 North -0.61 +- 0.78 Up 0.69 +- 1.64 mm L2002021200_espeG.glx

```

Nota. La figura muestra el archivo globk_espe_20033_20039, correspondiente a la materialización de la primera semana de procesamiento (2091) con la constelación GPS.

Una de las características que más se destaca en el software científico GAMIT/GLOBK, es la implementación del denominado filtro de Kalman, que según Montenegro (2005) “es un método de estimación lineal, cuyos parámetros se corrigen en cada iteración que este realice, dependiendo del error de predicción que se haya cometido en la iteración anterior” (p.33), lo que permite obtener una materialización de coordenadas mucho más próximos a la realidad y estadísticamente válidos.

Procesamiento en el software Bernese 5.2

Para el procesamiento de los datos GNSS de la REGME, se utilizó el software científico Bernese en su versión 5.2, en el entorno operativo de Windows. Al igual que para el software GAMIT/GLOBK, a continuación, se presentan los archivos de configuración y posteriores resultados correspondientes a la semana de procesamiento GPS 2091. Para más detalles sobre el procesamiento de los datos GNSS en este software se recomienda ver el Anexo C.

Preparación de insumos generales

El contenido de la carpeta “GEN” fue actualizada con archivos obtenidos del siguiente servidor: <http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/GEN/>, el archivo “PCV.I08” fue editado eliminando todo lo referente a el sistema de navegación satelital GALILEO, esto con la finalidad de evitar errores durante el procesamiento.

Los siguientes archivos: .CLK, .ERP, .EP y .TRO que corresponden a los archivos de reloj, de órbita, de efemérides y de tropósfera fueron descargados del servidor <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/AAAA>, donde “AAAA” debe ser reemplazado por el año de procesamiento de los datos. Los archivos previamente mencionados fueron colocados dentro de la carpeta “COD”. Así mismo los archivos de diferencia de código mensuales y los archivos .ION (datos ionosféricos) (descargados del mismo servidor), fueron colocados en la carpeta “BSW52”.

Ejecución de campañas

En este paso para el procesamiento en este software es generar las campañas de procesamiento. Primero se definió la semana y el día GPS en el cual se va a trabajar, procedimiento que se muestra a continuación:

Dentro de la opción “EDIT LIST OF CAMPAIGNS”, se debe añadir el nombre de la semana a las listas de campañas activas. Seguido de esto, se debe activar la dirección de campaña creada dentro de la carpeta “SELECT ACTIVE CAMPAIGN”.

Mediante la opción “CREATE NEW CAMPAIGN” (MENU->CAMPAING), y una vez especificada la dirección y el nombre, se crea la campaña de procesamiento. Una vez ejecutado este paso, se crean de forma automatizada los subdirectorios necesarios para los archivos de entrada, estos se ubican en el directorio “CAMPAIGN”, en la carpeta con el nombre seleccionado para la sesión que desea procesar.

Finalmente, necesita definir una “SESSION TABLE”. Una campaña consta de una o más tablas de sesión que cubren todo el período de monitoreo de datos. El identificador de la tabla de sesión es una cadena de cuatro caracteres que consta de “DDDF”, donde

“DDD” representa el día al inicio del intervalo (DOY) y “F” es un carácter alfanumérico que identifica la sesión de ese día. Una vez creada y configurada la "campana", todos los datos necesarios serán copiados y procesados por el software.

Generación de Process Control Files-PCF

El módulo “Process control Files (PCF)”, es el encargado de ejecutar el procesamiento automatizado dentro del software, mismos que deben ser creados y ejecutados en función de las necesidades de la campana y del usuario, para más detalles sobre esta configuración se recomienda ver el Anexo C.

El PCF predeterminado (por default) y el PCF generado se guardan en la carpeta “GPSUSER52> PCF”. Dentro de esta carpeta se necesita crear un nuevo archivo con una extensión .PCF. Este archivo es modificado por el software siguiendo los pasos que se muestran a continuación:

Primero, se mueve la lista de programas ejecutables cambiados automáticamente a “MENU->BPE->EDIT PROCES CONTROL FILE”. Dentro de la pantalla que aparece, debe agregar los programas que se ejecutan automáticamente en el orden que se muestra en el manual y se ejemplifica en la Figura 25. Una vez que se hayan importado todos los programas, se guardarán los cambios que se hayan realizado.

PCF para realizar el procesamiento de las soluciones diarias y semanales

Una vez preparada la información de entrada, se trabajó en forma automática desarrollando un PCF para ejecutar la rutina; la cual se configuró en el software de acuerdo con las condiciones requeridas. Las soluciones se han calculado para cada una de las Estaciones de Monitoreo Continuo seleccionadas anteriormente, utilizando los procedimientos que se describieron previamente.

Una vez que los archivos y la información de entrada se encuentra preparada, se procedió a desarrollar un “PCF”, el cual automatiza la ejecución de la rutina de procesamiento, esta rutina fue configurada en el software de acuerdo de las necesidades y condiciones requeridas. A continuación (Tabla 11), se muestran los procedimientos necesarios para el cálculo de las soluciones semanales de las estaciones de monitoreo continuo previamente seleccionadas.

Tabla 11

Etapas del procesamiento de datos

Etapa	Módulo	Descripción
Extrapolación de coordenadas	COOVEL	Cálculo de coordenadas a-prior en la época de procesamiento
Análisis de órbitas satelitales	POLUPDH	Generación de archivo de parámetros de orientación terrestre en el momento del procesamiento.

Etapa	Módulo	Descripción
Análisis de observaciones	PRETAB	Cálculo de órbitas tabulares (restablecer intervalos de seguimiento) en el tiempo de procesamiento. Corrección de relojes de satélite.
	ORBGENH	Generación de órbitas estándar (integración de ecuaciones de movimiento).
	RNXGRA	Análisis de observaciones GPS (archivos RINEX) (Número de épocas, saltos de ciclo, pérdidas de señal, entre otros).
	RNXSMT	Limpieza de observaciones de código (suavizado de la señal después de eliminar los saltos de ciclo y los valores atípicos).
Pre-procesamiento de datos	RXOBS	Importación de archivos RINEX preseleccionados a partir de los resultados del módulo RNXSMT.
	CODSPP	Generación de cero diferencias (notas de código). Sincronización de los relojes del receptor en la hora GPS.

Etapa	Módulo	Descripción
Procesamiento de datos	CODXTR	Obtención y análisis de los valores RMS del proceso de sincronización del reloj del receptor.
	SNGDIF	Selección de líneas de base (Estrategia. OBS-MAX).
	MAUPRP	Preprocesamiento de diferencias de fase simples. Detección y corrección de saltos de ciclo.
	MPRXTR	Obtener el número y la magnitud de los saltos de ciclo.
	GPSEST	Generación de diferencias de doble fase y combinaciones lineales L3.
	RESRMS	Detección de residuos y valores atípicos.
	GPSEST	Cálculo de ambigüedades reales (Solución preliminar).
	GPSXTR	Obtención y análisis de valores residuales y atípicos.
ADDNEQ2	Generación de la primera solución de coordenadas (solución flotante) (sin los enteros de ambigüedad determinados. Inclusión del modelo de carga de presión	

Etapa	Módulo	Descripción
Materialización de coordenadas	GPSXTR	atmosférica - modelo APLO-ERAin). Estimación de parámetros troposféricos.
	GPSXTR	Obtención y análisis de coordenadas obtenidas de la solución flotante.
	GNSQIF	Resolución de ambigüedades enteras por líneas de base (estrategia QIF. Inclusión de parámetros troposféricos obtenidos).
	AMBXTR	Obtención y análisis del número de ambigüedades resueltas.
	GPSCLU	Ajuste final de observaciones (inclusión de ambigüedades enteras, parámetros troposféricos (modelo VMF1) y modelo de carga de presión atmosférica (modelo APLOERAin).
	ADDNEQ2	Cálculo de parámetros de transformación entre las coordenadas base de la solución generada y las coordenadas base obtenidas de la solución plurianual. Estimación de los parámetros troposféricos finales.
	GPSXTR	Obtención y análisis de coordenadas finales.

Etapa	Módulo	Descripción
Combinación de soluciones	ADDNEQ2	Materialización de coordenadas semanales.

Nota. Se muestran los parámetros en cada etapa de procesamiento ejecutada en Bernese para el procesamiento de los datos GNSS.

Ejecución de un PCF

El programa de Berna gestiona el PCF a través del motor de procesamiento de Bernese “Bernese Processing Engine (BPE)”. Para estos casos, se realizan los siguientes pasos:

El primer paso es reiniciar la CPU. Es decir, cancela todos los procesos ejecutados previamente en el programa para evitar errores posteriores durante el procesamiento. Para ejecutar este paso se debe ir a el siguiente directorio “MENU->BPE->RESET CPU FILE”.

Una vez ejecutado el paso previamente descrito, se debe inicializar la rutina de procesamiento, para realizar este paso se debe ingresar a la siguiente dirección “MENU->BPE->START BPE PROCESSING”, seguido se desplegará una pantalla en donde, se debe indicar si se va a procesar la semana completa o solo un día de esta, a continuación, se selecciona la opción “NEXT”.

En esta nueva pantalla que se despliega, se debe seleccionar el PCF a ejecutarse. Por lo tanto, se selecciona la opción denominada “Process control file- (PCF)”.

Finalmente, y una vez seleccionado el PCF se ejecuta la opción "RUN" que da inicio a la ejecución del software.

Evaluación de las soluciones finales

Obtenido el conjunto general de soluciones semanales bajo el marco de referencia IGS14, el siguiente paso se centra en el análisis estadístico de las diferencias entre coordenadas, respecto a las soluciones generadas por SIRGAS. El análisis de resultados incluye principalmente el análisis de soluciones posicionales para evaluar la calidad de las soluciones obtenidas. En este sentido, los principales puntos a desarrollar son:

- Evaluación del modelo de procesamiento comparando soluciones semanales obtenidas y soluciones SIRGAS (precisión externa).
- Evaluación individual de las soluciones diarias analizando su repetitividad (precisión interna).

En general, y para poder evaluar la calidad de las soluciones posicionales generadas (en términos de precisión), es necesario que los diferentes pasos de procesamiento alcancen los parámetros de control indicados a continuación. Cálculo de solución final:

- Precisión externa: < 5 mm NE; < 15 mm U
- Precisión interna: < 5 mm NE; < 15 mm U

Cabe mencionar que, el análisis de la precisión externa únicamente se lo realizará con las coordenadas obtenidas en el procesamiento con la constelación GPS, esto debido

principalmente a que las soluciones de SIRGAS son obtenidas con la constelación satelital mencionada.

Además, se incluye un análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas cartesianas semanales de SIRGAS, es decir se realiza una resta entre coordenadas cartesianas semanales de SIRGAS con las coordenadas obtenidas del procesamiento de los datos GNSS en los softwares científicos. Esto con la finalidad de verificar la validez del procesamiento, ya que como se ha evidenciado en el presente proyecto la diferencia de coordenadas cartesianas entre SIRGAS y las obtenidas durante el procesamiento no superan un valor de diferencia de 10 cm, , al momento de transformar a un sistema local topocéntrico esta diferencia se traduce en un máximo de 5 mm lo que indica que la solución obtenida se encuentra dentro del rango previamente establecido.

Capítulo IV

Resultados y Análisis

Generalidades

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la investigación. Es importante señalar que, debido a la gran cantidad de datos evaluados y obtenidos, así como la cantidad de pasos y procedimientos realizados, en ciertos puntos solo se obtienen resultados de una estación de monitoreo continuo, que han sido seleccionadas para evidenciar algún resultado atípico o un dato por resaltar, la totalidad de los resultados se encuentran en los Anexos D, E y F.

Disponibilidad de datos por estación

En esta investigación se procesaron datos de un total de 13 semanas GPS, correspondientes a 91 días de 15 estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME. De esta forma, en base a la disponibilidad de datos y una vez realizado la recopilación de los mismos, el número final de registros por estación utilizados en este trabajo se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12*Disponibilidad de datos por estación*

N°	Nombre	Ubicación	Total de datos recopilados	Porcentual
1	ALEC	Alausí	91	100
2	CEEC	Celica	90	98.9
3	CHEC	El Chaco	91	100
4	CUEC	Cuenca	91	100
5	CXEC	Cotopaxi	91	100
6	DPEC	Posorja	91	100
7	EPEC	ESPE	86	94.5
8	GZEC	Gualaquiza	91	100
9	LJEC	Loja	90	98.9
10	ONEC	Chone	91	100
11	PAEC	Pedernales	91	100
12	POEC	Portoviejo	91	100
13	SEEC	Santa Elena	91	100
14	TPEC	Tiputini	91	100
15	TSEC	Taisha	91	100

Nota. Los archivos RINEX recopilados desde la semana 2091 hasta la semana 2103, suman por estación un total de 91.

Evaluación de soluciones posicionales

Análisis de precisión externa de las soluciones

Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas cartesianas semanales de SIRGAS.

A continuación, en las Tablas 13 y 15 se presentan las coordenadas cartesianas obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS de la estación ALEC, con la constelación satelital GPS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese respectivamente, que son comparadas con las coordenadas semanales proporcionadas por SIRGAS (<ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/>). En las Tablas 14 y 16 se muestran el resumen de los resultados estadísticos del análisis de los ΔX , ΔY & ΔZ .

Se realizó una comparación obteniendo un ΔX , ΔY & ΔZ , de la diferencia entre coordenadas cartesianas procesadas con las de SIRGAS. Los datos del resto de las estaciones GNSS procesadas, se encuentran en el ANEXO D y E.

Tabla 13

Diferencia ΔX, ΔY & ΔZ, entre coordenadas cartesianas SIRGAS y coordenadas cartesianas procesadas en el software GAMIT/GLOBK, constelación GPS.

Semana GPS	ALEC PROCESADAS						ALEC SIRGAS						ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)			
2091	1233231,856	-6255435,592	-243534,462	0,003	0,009	0,002	1233231,855	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	1,156	7,510	0,602
2092	1233231,856	-6255435,603	-243534,463	0,003	0,009	0,002	1233231,857	-6255435,603	-243534,463	0,00007	0,00022	0,00006	0,810	0,090	0,420
2093	1233231,857	-6255435,591	-243534,464	0,002	0,007	0,001	1233231,859	-6255435,607	-243534,463	0,00007	0,00021	0,00005	2,510	15,360	1,390
2094	1233231,855	-6255435,585	-243534,465	0,003	0,010	0,002	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00007	0,00022	0,00006	2,070	17,620	4,100
2095	1233231,856	-6255435,597	-243534,463	0,015	0,063	0,014	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00007	0,00022	0,00005	0,360	5,840	2,260
2096	1233231,853	-6255435,595	-243534,462	0,001	0,004	0,001	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00008	0,00025	0,00006	3,080	7,920	0,690
2097	1233231,854	-6255435,594	-243534,461	0,003	0,009	0,002	1233231,855	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00024	0,00006	1,200	5,840	0,520
2098	1233231,850	-6255435,580	-243534,462	0,003	0,010	0,002	1233231,855	-6255435,605	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	5,500	24,460	0,260
2099	1233231,853	-6255435,595	-243534,463	0,003	0,009	0,002	1233231,857	-6255435,602	-243534,461	0,00008	0,00023	0,00006	3,570	7,320	1,560
2100	1233231,855	-6255435,598	-243534,462	0,002	0,007	0,002	1233231,856	-6255435,603	-243534,463	0,00008	0,00022	0,00006	1,140	4,950	0,830
2101	1233231,854	-6255435,595	-243534,461	0,001	0,004	0,001	1233231,856	-6255435,600	-243534,461	0,00008	0,00023	0,00006	2,390	4,750	0,300
2102	1233231,856	-6255435,588	-243534,464	0,002	0,009	0,002	1233231,856	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	0,270	12,530	1,860
2103	1233231,852	-6255435,588	-243534,460	0,002	0,009	0,002	1233231,856	-6255435,599	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	4,380	11,270	2,430

Nota. La Tabla muestra los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS de la REGME, con sus precisiones. Así mismo se muestran las coordenadas semanales de SIRGAS. En las semanas de SIRGAS que no se cuenta con datos de coordenadas, se colocó un guion (-), ver Anexo D.

Para las coordenadas semanales de SIRGAS, en algunos casos no se contaba con información de las estaciones seleccionadas para el procesamiento, por lo que en esos casos se procedió a no considerar esa semana de procesamiento para la comparación de los resultados alcanzados. Este caso se ve evidenciado en la estación CEEC, cuyas semanas desde la 2091 hasta la 2098 no contaban con registros en el FTP de SIRGAS.

Los ΔX , ΔY & ΔZ , se encuentran en milímetros, el rango aceptable en los diferenciales es de hasta 10 cm., los valores que se evidencian en la Tabla 14 y en el Anexo D no superan este valor por lo que están dentro del rango tolerable de aceptación de la solución. Las semanas 2093 y 2094, son las semanas que alcanzan los valores más altos en ΔY , sin embargo, no superan el límite de tolerancia preestablecido, por lo que se acepta la solución procesada.

Si suponemos que todas las fuentes de error pudieran ser perfectamente modeladas, la precisión en la componente vertical seguirá siendo menor debido a que solo es posible observar satélites sobre el horizonte, por lo que la geometría de los satélites disminuye la precisión de esta coordenada. Pero además casi todos los fenómenos que provocan variaciones a lo largo del tiempo en las coordenadas de las estaciones, presentan mayores variaciones en la componente vertical, por lo que también son en parte responsables de la menor precisión de la elevación.

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK con la constelación GPS, en coordenadas cartesianas.

Tabla 14

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK.

	ALEC				LJEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	5,50	24,46	4,10	Máximo	6,08	17,40	4,04
Mínimo	0,27	0,09	0,26	Mínimo	0,06	0,08	0,01
Media aritmética	2,19	9,65	1,33	Media aritmética	1,84	6,14	1,46
Desviación estándar	1,60	6,49	1,12	Desviación estándar	1,69	5,78	1,18
	CEEC				ONEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	1,77	5,60	0,71	Máximo	4,75	20,06	4,27
Mínimo	0,09	2,03	0,53	Mínimo	0,31	0,96	0,36
Media aritmética	0,92	3,60	0,61	Media aritmética	2,36	6,59	2,00
Desv. Estándar	0,76	1,65	0,09	Desv. Estándar	1,24	5,32	1,29
	CHEC				PAEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	5,04	10,64	4,37	Máximo	3,73	22,64	4,43
Mínimo	0,17	0,37	0,25	Mínimo	0,17	0,99	0,07
Media aritmética	1,87	4,74	2,19	Media aritmética	1,65	8,09	2,32
Desviación estándar	1,41	3,34	1,42	Desviación estándar	1,04	6,75	1,51

CUEC				POEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	4,79	16,39	2,71	Máximo	3,78	17,86	5,92
Mínimo	0,10	0,28	0,01	Mínimo	0,02	1,71	0,54
Media aritmética	1,89	5,19	1,23	Media aritmética	1,89	7,89	2,64
Desviación estándar	1,36	4,80	0,77	Desviación estándar	1,29	4,78	1,46
CXEC				SEEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	4,15	9,36	4,37	Máximo	2,30	10,64	100,16
Mínimo	0,29	1,50	1,04	Mínimo	0,65	0,17	0,37
Media aritmética	2,09	4,34	2,37	Media aritmética	1,67	4,89	9,45
Desviación estándar	1,18	2,47	0,99	Desviación estándar	0,53	3,53	27,27
DPEC				TPEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	3,42	14,15	3,41	Máximo	6,67	14,61	4,81
Mínimo	0,05	0,81	0,22	Mínimo	0,09	0,88	0,01
Media aritmética	1,86	4,42	1,92	Media aritmética	2,31	6,07	1,67
Desviación estándar	0,96	4,05	1,03	Desviación estándar	2,26	4,29	1,60
EPEC				TSEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	3,34	13,30	5,20	Máximo	5,74	15,58	6,75
Mínimo	0,69	0,73	0,05	Mínimo	0,41	1,38	0,12
Media aritmética	1,83	3,92	2,23	Media aritmética	2,55	5,82	2,17
Desviación estándar	0,86	3,91	1,47	Desviación estándar	1,58	4,40	1,93

GZEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	5,71	18,70	5,47
Mínimo	0,00	1,35	0,00
Media aritmética	2,64	8,45	1,52
Desviación estándar	1,85	5,11	1,52

Nota. La Tabla muestra los resultados estadísticos del ΔX , ΔY , ΔZ , entre las coordenadas procesadas con GPS en el software GAMIT/GLOBK y las coordenadas del FTP de SIRGAS.

En la Tabla 14, se muestran los resultados del análisis de medidas estadísticas empleadas para la validación de los datos GNSS procesados. La media aritmética, indica el RMS de procesamiento, este valor como se definió previamente no debe superar los 10 cm., para la comparación entre coordenadas cartesianas (procesadas vs oficiales de SIRGAS).

Como se evidencia, para el caso del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK, con la constelación GPS y comparada con las soluciones semanales emitidas por SIRGAS no superan el límite previamente descrito. En la Tabla 12, se observa que los resultados de la media aritmética incluso no superan el cm en el RMS alcanzado, esto se puede justificar debido a que SIRGAS realiza la materialización de sus soluciones semanales con la constelación GPS, si bien es cierto lo realizan en el software Bernese; autores como Cimbaro (2008), indican que la diferencia media entre las coordenadas obtenidas a través de los software GAMIT/GLOBK y Bernese se

encuentra alrededor de los 5 mm de error, lo que justifica los RMS alcanzados para este caso en específico.

A continuación, en las Tablas 15 y 16 se muestra la comparación realizada entre las coordenadas obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en el software Bernese 5.2 con la constelación GPS, estas se comparan con las soluciones semanales de SIRGAS lo que permitió obtener los ΔX , ΔY & ΔZ y las posteriores medidas estadísticas.

Tabla 15

*Diferencia ΔX, ΔY & ΔZ, entre coordenadas cartesianas SIRGAS y coordenadas cartesianas procesadas en el software Bernese
5.2, constelación GPS.*

semana GPS	ALEC PROCESADAS						ALEC SIRGAS						ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ(mm)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)			
2091	1233231,833	-6255435,557	-243534,457	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,855	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	22,214	42,978	4,392
2092	1233231,829	-6255435,553	-243534,451	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,857	-6255435,603	-243534,463	0,00007	0,00022	0,00006	28,259	50,602	12,058
2093	1233231,826	-6255435,532	-243534,454	0,0007	0,0009	0,0004	1233231,859	-6255435,607	-243534,463	0,00007	0,00021	0,00005	33,321	74,424	8,558
2094	1233231,823	-6255435,546	-243534,454	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00007	0,00022	0,00006	34,644	56,762	6,803
2095	1233231,823	-6255435,544	-243534,448	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00007	0,00022	0,00005	33,444	58,671	12,861
2096	1233231,822	-6255435,545	-243534,459	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,857	-6255435,603	-243534,461	0,00008	0,00025	0,00006	34,572	57,996	1,959
2097	1233231,829	-6255435,556	-243534,454	0,0007	0,0001	0,0005	1233231,855	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00024	0,00006	25,887	44,207	7,991
2098	-	-	-	-	-	-	1233231,855	-6255435,605	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	-	-	-
2099	1233231,833	-6255435,551	-243534,442	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,857	-6255435,602	-243534,461	0,00008	0,00023	0,00006	23,543	51,323	19,451
2100	1233231,829	-6255435,547	-243534,452	0,0002	0,0010	0,0005	1233231,856	-6255435,603	-243534,463	0,00008	0,00022	0,00006	26,692	56,203	11,169
2101	1233231,839	-6255435,561	-243534,460	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,856	-6255435,600	-243534,461	0,00008	0,00023	0,00006	17,388	38,990	0,733
2102	1233231,824	-6255435,537	-243534,464	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,856	-6255435,600	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	32,397	63,696	2,186
2103	1233231,826	-6255435,553	-243534,461	0,0007	0,0010	0,0005	1233231,856	-6255435,599	-243534,462	0,00008	0,00023	0,00006	29,654	46,242	1,306

Nota. La Tabla muestra los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS de la REGME, con sus precisiones. Así mismo se muestran las coordenadas semanales de SIRGAS. En las semanas de SIRGAS que no se cuenta con datos de coordenadas, se colocó un guion (-), ver Anexo E.

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico Bernese 5.2 con la constelación GPS, en coordenadas cartesianas.

Tabla 16

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico Bernese 5.2.

ALEC				LJEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	34,64	74,42	19,45	Máximo	34,60	73,25	18,88
Mínimo	17,39	38,99	0,73	Mínimo	16,52	38,51	0,07
Media aritmética	28,50	53,51	7,46	Media aritmética	28,30	52,63	6,89
Desviación estándar	5,53	9,91	5,72	Desviación estándar	5,97	10,11	5,65
CEEC				ONEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	32,67	62,94	3,61	Máximo	35,17	71,88	19,37
Mínimo	17,19	38,14	0,48	Mínimo	16,32	38,25	0,65
Media aritmética	26,41	48,76	1,56	Media aritmética	28,24	52,05	7,67
Desviación estándar	8,15	12,78	1,78	Desviación estándar	5,88	9,79	5,70
CHEC				PAEC			
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	34,29	72,54	19,75	Máximo	35,08	72,80	19,66
Mínimo	17,47	38,51	0,77	Mínimo	17,08	37,56	0,74
Media aritmética	28,12	52,54	7,68	Media aritmética	28,47	52,48	7,90

Desviación estándar	5,38	9,52	5,90	Desviación estándar	5,68	9,81	5,72
CUEC			POEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	35,18	73,77	18,57	Máximo	35,46	73,30	19,59
Mínimo	16,72	37,89	0,87	Mínimo	17,06	38,60	0,56
Media aritmética	28,08	52,70	7,15	Media aritmética	28,58	52,84	7,59
Desviación estándar	5,83	10,03	5,47	Desviación estándar	5,89	10,00	5,80
CXEC			SEEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	35,04	73,60	19,52	Máximo	35,77	73,19	78,65
Mínimo	17,03	38,50	0,47	Mínimo	16,70	37,27	0,61
Media aritmética	28,21	52,59	7,46	Media aritmética	28,73	52,08	12,37
Desviación estándar	5,71	9,77	5,80	Desviación estándar	5,99	10,20	21,31
DPEC			TPEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	35,16	73,12	12,29	Máximo	34,83	74,06	19,41
Mínimo	16,38	38,20	0,24	Mínimo	16,20	40,04	1,18
Media aritmética	29,48	52,55	5,80	Media aritmética	27,46	53,75	7,55
Desviación estándar	6,14	11,02	4,41	Desviación estándar	5,88	10,04	5,66
EPEC			TSEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	34,69	72,69	24,50	Máximo	33,25	71,39	19,98
Mínimo	16,63	37,92	0,99	Mínimo	17,16	38,29	0,18

Media aritmética	28,04	53,15	8,21	Media aritmética	27,85	53,31	7,31
Desviación estándar	5,94	9,78	7,12	Desviación estándar	5,65	9,27	5,90
GZEC							
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)				
Máximo	34,42	74,59	18,82				
Mínimo	17,01	38,16	0,03				
Media aritmética	28,16	52,95	7,00				
Desviación estándar	5,81	10,28	5,68				

Nota. La Tabla muestra los resultados estadísticos del ΔX , ΔY , ΔZ , entre las coordenadas procesadas con GPS en el software Bernese y las coordenadas del FTP de SIRGAS.

La Tabla 16, presenta los resultados producto del análisis de medidas estadísticas empleadas para la validación de los datos GNSS procesados, utilizados en el desarrollo del presente proyecto. La media aritmética, exterioriza el RMS de procesamiento, este valor como se definió previamente no debe superar los 10 cm., para la comparación entre coordenadas cartesianas (procesadas vs oficiales de SIRGAS).

Luego de realizado el procesamiento de los datos GNSS, en el software Bernese con la constelación GPS y tomando como parámetro de referencia a las soluciones semanales expuestas por SIRGAS para la comprobación de resultados, se evidencia que el límite definido anteriormente no es superado. En la Tabla 16, se describen los resultados de las medias aritméticas de las estaciones procesadas y se evidencia que los valores están en un rango de 2 a 5 cm en el RMS alcanzado en el procesamiento; motivo por el cual se determina que el resultado del cumple con los parámetros establecidos. Sin

embargo, al realizar un símil con los resultados del procesamiento paralelo que se ejecutó en el software GAMIT/GLOBK, se encuentra una diferencia entre los valores RMS alcanzados por cada paquete informático, siendo el software GAMIT/GLOBK el que alcanza valores menores en sus medias aritméticas.

A continuación, en las Tablas 17 y 18, se muestra el análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK con las constelaciones GPS y GLONASS, es decir se muestran los resultados de la comparación de las soluciones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS materializadas con la constelación GPS y materializados con la constelación GLONASS. Se obtuvieron tres diferenciales ΔX , ΔY & ΔZ , que indican las diferencias en mm entre soluciones, esta comparación se la realizó con las coordenadas cartesianas resultantes del procesamiento.

En la Tabla 17 se muestran los resultados para la estación ALEC, la totalidad del procesamiento se encuentra en el Anexo F.

Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK con las constelaciones GPS y GLONASS.

Tabla 17

Diferencia ΔX , ΔY & ΔZ , entre coordenadas cartesianas GPS y coordenadas cartesianas GLONASS procesadas en el software GAMIT/GLOBK.

Semana GPS	ALEC GLONASS						ALEC GPS						ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)			
2091	1233231,855	-6255435,586	-243534,459	0,010	0,017	0,004	1233231,856	-6255435,592	-243534,462	0,003	0,009	0,002	1,06	5,94	3,24
2092	1233231,852	-6255435,597	-243534,460	0,010	0,015	0,004	1233231,856	-6255435,603	-243534,463	0,003	0,009	0,002	4,41	5,78	3,22
2093	1233231,855	-6255435,607	-243534,462	0,007	0,010	0,002	1233231,857	-6255435,591	-243534,464	0,002	0,007	0,001	1,99	15,53	2,35
2094	1233231,865	-6255435,610	-243534,463	0,005	0,009	0,002	1233231,855	-6255435,585	-243534,465	0,003	0,010	0,002	9,17	24,91	2,08
2095	1233231,849	-6255435,598	-243534,470	0,331	0,170	0,041	1233231,856	-6255435,597	-243534,463	0,015	0,063	0,014	7,54	1,45	7,06
2096	1233231,863	-6255435,594	-243534,469	0,004	0,008	0,002	1233231,853	-6255435,595	-243534,462	0,001	0,004	0,001	9,20	0,85	6,77
2097	1233231,858	-6255435,584	-243534,470	0,004	0,009	0,002	1233231,854	-6255435,594	-243534,461	0,003	0,009	0,002	4,42	9,86	8,33
2098	1233231,841	-6255435,577	-243534,470	0,006	0,013	0,003	1233231,850	-6255435,580	-243534,462	0,003	0,010	0,002	9,36	3,47	7,56
2099	1233231,859	-6255435,587	-243534,469	0,003	0,007	0,002	1233231,853	-6255435,595	-243534,463	0,003	0,009	0,002	6,24	8,06	6,48
2100	1233231,861	-6255435,580	-243534,468	0,004	0,009	0,002	1233231,855	-6255435,598	-243534,462	0,002	0,007	0,002	6,32	18,37	5,54
2101	-	-	-	-	-	-	1233231,854	-6255435,595	-243534,461	0,001	0,004	0,001	-	-	-
2102	1233231,864	-6255435,590	-243534,462	0,004	0,008	0,002	1233231,856	-6255435,588	-243534,464	0,002	0,009	0,002	7,55	1,90	1,99
2103	1233231,863	-6255435,593	-243534,462	0,004	0,009	0,002	1233231,852	-6255435,588	-243534,460	0,002	0,009	0,002	11,40	4,87	1,87

Nota. La Tabla muestra los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS de la REGME, con sus precisiones. Se diferencia las constelaciones GPS y GLONASS.

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas cartesianas semanales procesados con las constelaciones GPS y GLONASS con software científico GAMIT/GLOBK.

Tabla 18

Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS y con la constelación GLONASS.

	ALEC				LJEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	11,40	24,91	8,33	Máximo	13,98	26,48	6,69
Mínimo	1,06	0,85	1,87	Mínimo	0,50	0,96	0,65
Media aritmética	6,56	8,42	4,71	Media aritmética	5,19	8,91	4,64
Desviación estándar	3,13	7,52	2,47	Desviación estándar	3,75	6,90	1,66
	CEEC				ONEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	24,76	25,34	5,77	Máximo	15,15	24,73	7,06
Mínimo	3,10	4,83	2,53	Mínimo	1,35	0,38	0,68
Media aritmética	10,75	14,75	3,65	Media aritmética	5,37	10,27	4,00
Desviación estándar	7,68	7,30	1,05	Desviación estándar	4,21	8,69	1,84
	CHEC				PAEC		
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	12,27	20,53	7,40	Máximo	19,26	33,99	6,11
Mínimo	0,99	0,37	0,41	Mínimo	0,52	0,17	1,11
Media aritmética	6,08	10,81	4,53	Media aritmética	5,69	12,32	3,75

Desviación estándar	3,54	7,28	1,77	Desviación estándar	5,29	10,29	1,40
CUEC			POEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	14,82	26,43	7,02	Máximo	11,38	2,62	5,07
Mínimo	0,75	0,47	0,06	Mínimo	20,31	24,70	5,27
Media aritmética	4,34	10,41	4,36	Media aritmética	0,58	2,62	0,97
Desviación estándar	4,48	7,65	1,94	Desviación estándar	5,97	11,73	3,46
CXEC			SEEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	13,80	21,00	7,06	Máximo	15,74	21,61	6,87
Mínimo	2,04	1,39	1,29	Mínimo	0,66	0,02	0,04
Media aritmética	5,38	9,91	3,89	Media aritmética	5,14	8,34	3,95
Desviación estándar	3,14	7,43	1,72	Desviación estándar	4,19	6,33	1,62
DPEC			TPEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	15,78	27,68	7,53	Máximo	12,38	27,43	7,81
Mínimo	0,12	3,55	1,09	Mínimo	0,41	0,23	0,29
Media aritmética	4,60	11,83	4,35	Media aritmética	5,50	13,82	3,91
Desviación estándar	5,11	7,70	1,88	Desviación estándar	4,05	8,58	2,39
EPEC			TSEC				
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
Máximo	16,70	25,34	7,73	Máximo	13,23	23,44	9,44
Mínimo	0,11	1,35	0,37	Mínimo	2,42	2,33	0,08
Media aritmética	4,11	12,56	3,94	Media aritmética	7,44	12,15	4,85

Desviación estándar	4,63	7,63	2,09	Desviación estándar	3,51	7,49	2,76
GZEC							
	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)				
Máximo	7,26	32,84	7,67				
Mínimo	0,07	0,03	0,06				
Media aritmética	3,12	7,59	4,12				
Desviación estándar	2,28	9,12	2,19				

Nota. La Tabla muestra los resultados estadísticos del ΔX , ΔY , ΔZ , entre las coordenadas procesadas con GPS y GLONASS en el software GAMIT/GLOBK.

Para el procesamiento de los datos GNSS con la constelación satelital GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK, de las 13 semanas de la campaña de procesamiento, únicamente se procesaron 12, esto debido a que para la semana 2101 no se contaba con registros de la constelación GLONASS en los archivos RINEX.

Al igual que en la comparación realizada entre GPS y las soluciones de SIRGAS, los ΔX , ΔY & ΔZ , se encuentran en milímetros, el rango aceptable en los diferenciales es de hasta 10 cm., los valores que se evidencian en la Tabla 18 y en el Anexo F no superan este valor por lo que están dentro del rango tolerable de aceptación de la solución. Sin embargo, las medias aritméticas mostradas en la Tabla 16, indican valores más elevados en los tres diferenciales obtenidos (ΔX (mm), ΔY (mm), ΔZ (mm)).

Una de las causas que motivan esta diferencia y que se evidenció durante la ejecución del presente proyecto, fue que al momento de procesar los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK, este utiliza modelos de corrección diseñados para la

constelación GPS, si bien es cierto esto se traduce en errores milimétricos, si se quisiera realizar un marco de referencia nacional se debería considerar estos aspectos.

El promedio de las medias aritméticas de la Tabla 18 para los tres diferenciales obtenidos (ΔX (mm), ΔY (mm), ΔZ (mm)), son de 5.70 mm, 10.97 mm, 8.85mm, respectivamente, se observan valores dentro del rango de los 10 cm de tolerancia, inclusive en ninguna estación se supera los 5 cm., en ninguno de los diferenciales ΔX , ΔY & ΔZ .

A continuación, se muestra el análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas semanales de SIRGAS (precisión externa), realizado con respecto a un sistema local topocéntrico (ENU).

Análisis de diferencias de las coordenadas semanales procesadas en GAMIT/GLOBK y Bernese con respecto a las coordenadas semanales de SIRGAS, precisión externa con respecto a un sistema local topocéntrico (ENU)

Para evaluar la consistencia del modelo de procesamiento en relación al modelo SIRGAS, se compararon las soluciones semanales obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS con los softwares científicos GAMIT/GLOBK y Bernese, con las soluciones SIRGAS semanales obtenidas a través del protocolo FTP de su sitio web oficial.

Como coordenada de referencia para el sistema local topocéntrico, se seleccionó un promedio de las soluciones obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS con los softwares científicos empleados en el presente proyecto. Con base en este precepto, las Figuras 27 y 28 muestran los promedios de las diferencias residuales obtenidas por

componente para cada una de las estaciones evaluadas, así como sus respectivas desviaciones estándar. En la Tabla 19 se presenta un resumen detallado de los valores obtenidos para cada estación.

Coordenadas ENU, GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK

Tabla 19

Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las soluciones semanales de SIRGAS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK

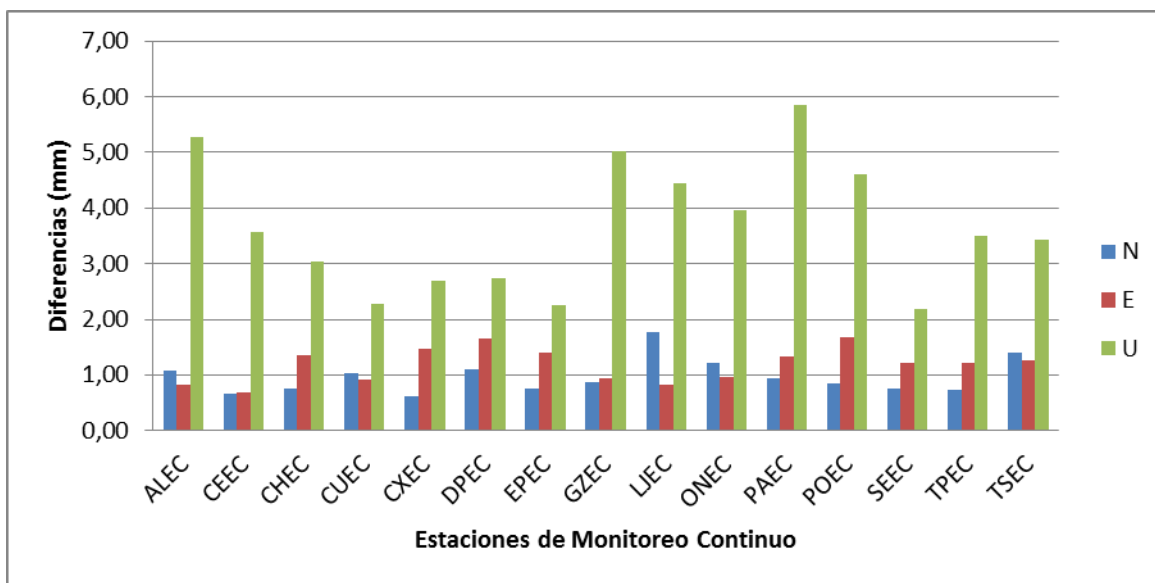
Nº	Estación	Norte	Este	Altitud
		Media (mm)	Media (mm)	Media (mm)
1	ALEC	1,07	0,83	5,27
2	CEEC	0,66	0,68	3,56
3	CHEC	0,75	1,36	3,04
4	CUEC	1,03	0,93	2,29
5	CXEC	0,61	1,46	2,69
6	DPEC	1,10	1,67	2,74
7	EPEC	0,75	1,39	2,25
8	GZEC	0,87	0,95	5,01
9	LJEC	1,76	0,83	4,44
10	ONEC	1,23	0,97	3,95
11	PAEC	0,94	1,34	5,86
12	POEC	0,85	1,68	4,60

13	SEEC	0,77	1,21	2,19
14	TPEC	0,73	1,21	3,51
15	TSEC	1,41	1,26	3,44
Media		0,97	1,18	3,66
Máximo		1,76	1,68	5,86
Mínimo		0,61	0,68	2,19

Nota. La Tabla muestra los resultados de las medias de los ΔE , ΔN , ΔU , entre las coordenadas procesadas con GPS, comparadas con las coordenadas de SIRGAS, en el software GAMIT/GLOBK.

Figura 27

Diferencias entre las medias de soluciones SIRGAS y datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, constelación GPS



Nota. La figura muestra las diferencias entre las medias de las soluciones SIRGAS y las soluciones de las semanas procesadas en el software GAMIT/GLOBK, constelación GPS.

Los resultados presentados en la Tabla 19 muestran que, para el caso de las 15 estaciones procesadas, sus soluciones están dentro del rango sugerido en la metodología del presente proyecto (Evaluación de las soluciones finales) para ser consideradas soluciones consistentes con las soluciones continentales SIRGAS. Dados los resultados obtenidos, principalmente en la media aritmética que es el indicador del RMS de cada base procesada, el modelo puede considerarse estable y consistente (precisión externa de la solución) con las soluciones del sistema regional SIRGAS. Cabe mencionar que los resultados que se muestran en la Tabla 19 son para la constelación satelital GPS en el software científico GAMIT/GLOBK.

En la Figura 27, se muestran las diferencias entre las medias de soluciones SIRGAS y datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, con la constelación GPS. Considerando que el sistema local topocéntrico se encuentra referido a una coordenada a priori obtenida del promedio de las 13 semanas de procesamiento, los resultados obtenidos muestran rangos dentro de los 5 mm para este y norte y 15 mm para la altitud, lo que indica que la solución se puede considerar como válida.

Coordenadas ENU, GPS comparadas con GLONASS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK

Tabla 20

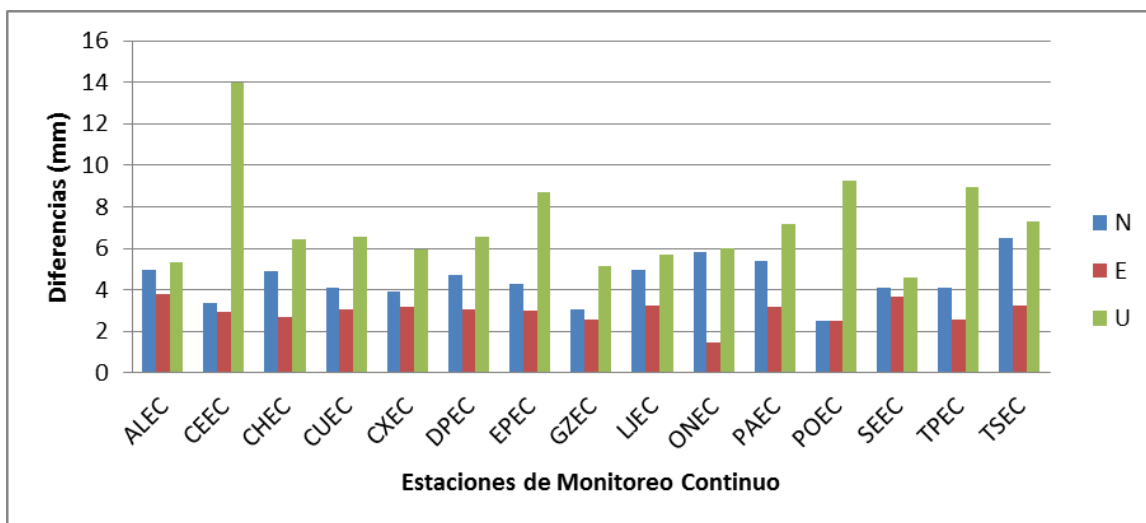
Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las obtenidas de la constelación GLONASS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK

Nº	Estación	Norte	Este	Altitud
		Media (mm)	Media (mm)	Media (mm)
1	ALEC	4,98	3,82	5,30
2	CEEC	3,36	2,91	13,98
3	CHEC	4,87	2,69	6,46
4	CUEC	4,07	3,08	6,56
5	CXEC	3,92	3,16	5,93
6	DPEC	4,71	3,07	6,55
7	EPEC	4,31	3,02	8,68
8	GZEC	3,06	2,55	5,16
9	LJEC	4,98	3,23	5,72
10	ONEC	5,80	1,46	6,03
11	PAEC	5,41	3,15	7,20
12	POEC	2,51	2,49	9,27
13	SEEC	4,08	3,64	4,57
14	TPEC	4,12	2,54	8,96
15	TSEC	6,47	3,24	7,29
	Media	4,44	2,94	7,18
	Máximo	6,47	3,82	13,98
	Mínimo	2,51	1,46	4,57

Nota. La Tabla muestra los resultados de las medias aritméticas calculadas entre las coordenadas procesadas con GPS, comparadas con las procesadas con GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK.

Figura 28

Diferencias entre las medias de datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, comparación entre las constelaciones GPS y GLONASS.



Nota. La figura muestra las diferencias entre las medias de datos GNNS procesados en GAMIT/GLOBK, comparación entre las constelaciones GPS y GLONASS

Los resultados presentados en la Tabla 20 muestran que la media de la precisión externa entre GPS y GLONASS, de los datos GNSS de las 13 semanas procesados en GAMIT/GLOBK, se encuentran dentro de los límites de RMS preestablecidos. Sin embargo, se evidencia un incremento en los valores del RMS, esto se puede deber a los modelos ocupados por el software durante el procesamiento de los datos GNSS, son diseñados para corregir los errores de posicionamiento que se dan con la constelación GPS, mismos que adaptan para la constelacion GLONASS, lo que incurre en errores milimétricos en los resultados finales.

Adicional, se muestra que, para el caso de 12 de las 15 estaciones procesadas, sus soluciones están dentro del rango sugerido (RMS) para ser consideradas soluciones consistentes con las soluciones procedas con la constelación GPS. En el caso específico

de la estación TSEC, que tiene una diferencia promedio de 6.47 mm para la componente norte, se puede decir que, dado que el valor es representativo solo en una de las tres componentes, esto se puede atribuir a la inclusión de un término de sesgo en el proceso de materialización de las soluciones en función de la longitud de las líneas de base.

Coordenadas ENU, GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software Bernese

Tabla 21

Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS, procesadas en el software Bernese.

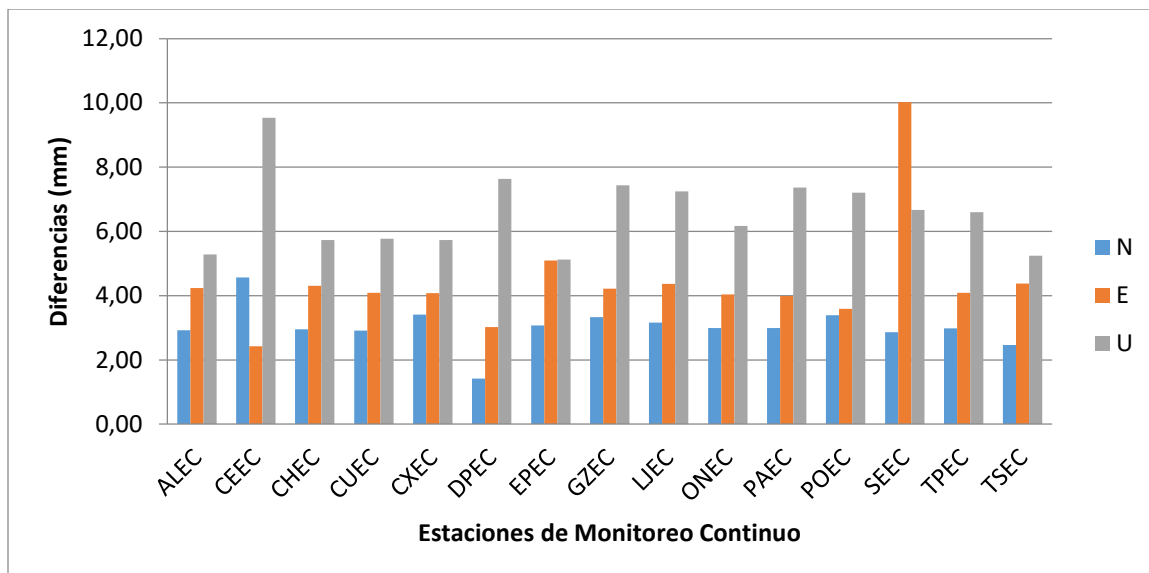
Nº	Estación	Norte	Este	Altitud
		Media (mm)	Media (mm)	Media (mm)
1	ALEC	2,93	4,24	5,28
2	CEEC	4,56	2,42	9,53
3	CHEC	2,95	4,31	5,73
4	CUEC	2,91	4,09	5,77
5	CXEC	3,41	4,08	5,73
6	DPEC	1,41	3,03	7,64
7	EPEC	3,07	5,09	5,12
8	GZEC	3,33	4,22	7,44
9	LJEC	3,16	4,37	7,25
10	ONEC	2,99	4,04	6,17
11	PAEC	2,99	3,99	7,36
12	POEC	3,39	3,59	7,20

13	SEEC	2,87	10,02	6,67
14	TPEC	2,99	4,09	6,59
15	TSEC	2,46	4,37	5,25
Media		3,03	4,40	6,58
Máximo		4,56	10,02	9,53
Mínimo		1,41	2,42	5,12

Nota. La Tabla muestra los resultados de las medias aritméticas, calculadas entre las coordenadas procesadas con GPS, y comparadas con las coordenadas SIRGA ENU, en el software Bernese.

Figura 29

Diferencias de las medias entre coordenadas ENU, procesados en Bernese, con la constelación GPS, comparada con SIRGAS.



Nota. La figura muestra las diferencias medias de las coordenadas ENU, procesadas en Bernese con las coordenadas ENU SIRGAS, con la constelación GPS.

Los valores presentados en la Tabla 21, exponen que la media de la precisión externa, de los datos GNSS de las 13 semanas procesados en Bernese, se encuentran por debajo de los límites de RMS preestablecidos.

Al mismo tiempo, se exterioriza que, para el caso de 14 de las 15 estaciones procesadas, sus soluciones están dentro del rango sugerido (RMS) para ser consideradas soluciones consistentes con las soluciones procedas con la constelación GPS. En el caso específico de la estación SEEC, que tiene una diferencia promedio de 10.02 mm para el componente este, se puede decir que, dado que el valor es representativo solo en una de las tres componentes, no afecta del proceso de materialización de las soluciones.

Análisis de precisión interna de las soluciones

Una vez realizado el análisis de la precisión externa de las soluciones, el siguiente paso es el análisis de la precisión interna o también llamado repetitividad diaria (REPD) de las coordenadas de cada estación. Para ello, fue necesario generar la correspondiente serie de residuos para cada uno de los componentes de las estaciones, así como su respectivo preanálisis y filtrado con el fin de eliminar posibles errores groseros.

Finalmente, se calcula la media y la desviación estándar del conjunto total de residuos (valores absolutos) para obtener la repetitividad promedio de las coordenadas por componente y por estación. En las Figuras 30 y 31, así como en las Tablas 22 y 23, se presenta el promedio de la repetitividad diaria de cada una de las estaciones obtenida para la campaña de procesamiento (13 semanas).

Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GPS, en el software GAMIT/GLOBK

Tabla 22

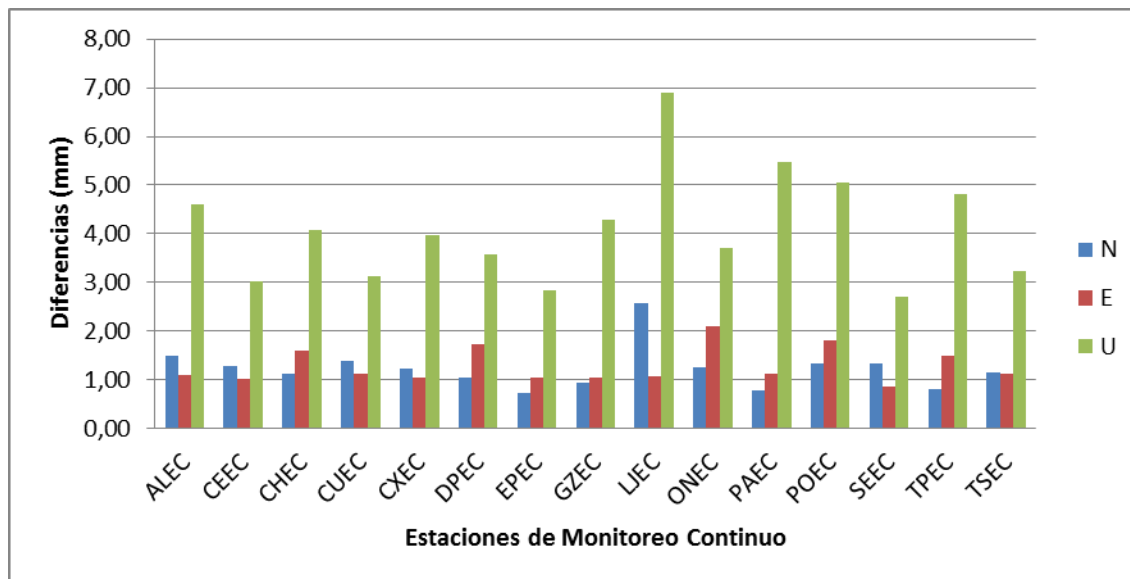
Resultados estadísticos de las medias (repetitividad) por estaciones procesadas, con la constelación GPS, en el software GAMIT/GLOBK.

Nº	Estación	Norte Media (mm)	Este Media (mm)	Altitud Media (mm)
1	ALEC	1,50	1,11	4,60
2	CEEC	1,28	1,03	3,03
3	CHEC	1,14	1,61	4,09

4	CUEC	1,39	1,13	3,13
5	CXEC	1,24	1,04	3,96
6	DPEC	1,04	1,75	3,59
7	EPEC	0,73	1,05	2,83
8	GZEC	0,94	1,06	4,30
9	LJEC	2,57	1,09	6,88
10	ONEC	1,25	2,11	3,71
11	PAEC	0,79	1,13	5,47
12	POEC	1,33	1,82	5,06
13	SEEC	1,33	0,87	2,72
14	TPEC	0,82	1,51	4,81
15	TSEC	1,16	1,14	3,23
Media		1,24	1,30	4,09
Máximo		2,57	2,11	6,88
Mínimo		0,73	0,87	2,72

Figura 30

Repetitividad media de las soluciones



Nota. La figura muestra las diferencias medias entre datos GNSS procesados en GAMIT/GLOBK, con la constelación GPS.

En base en los resultados presentados, es posible concluir que las 15 estaciones procesadas tienen soluciones con repetitividad igual o menor al rango sugerido en esta investigación para ser consideradas soluciones precisas, valores menores a 5 mm para el Norte y el Este, y 15 mm para el componente vertical.

Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK

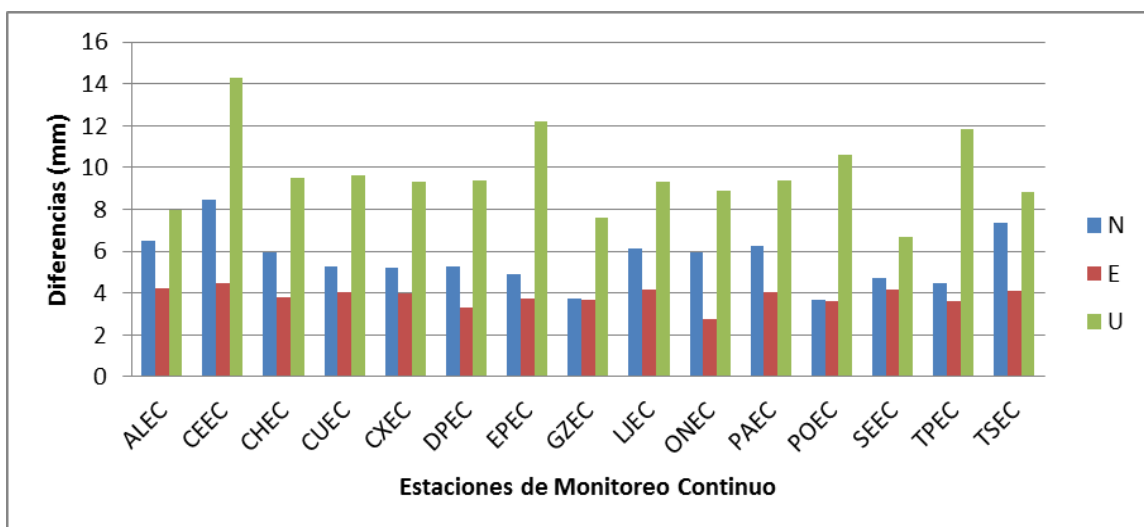
Tabla 23

Resultados estadísticos de las medias (repetitividad) por estaciones procesadas, con la constelación GLONASS, en el software GAMIT/GLOBK.

Nº	Estación	Norte Media (mm)	Este Media (mm)	Altitud Media (mm)
1	ALEC	6,47	4,20	7,99
2	CEEC	8,48	4,44	14,31
3	CHEC	5,97	3,81	9,48
4	CUEC	5,26	4,06	9,61
5	CXEC	5,18	3,97	9,33
6	DPEC	5,25	3,29	9,35
7	EPEC	4,92	3,74	12,21
8	GZEC	3,72	3,66	7,58
9	LJEC	6,14	4,19	9,30
10	ONEC	5,94	2,75	8,87
11	PAEC	6,26	4,03	9,39
12	POEC	3,68	3,61	10,62
13	SEEC	4,74	4,17	6,65
14	TPEC	4,50	3,61	11,85
15	TSEC	7,33	4,07	8,82
	Media	5,59	3,84	9,69
	Máximo	8,48	4,44	14,31
	Mínimo	3,68	2,75	6,65

Figura 31

Repetitividad media de las soluciones



Como es de conocimiento, la repetitividad interna (precisión interna) indica la precisión de mi coordenada materializada y en base en los resultados presentados en la Tabla 23, se observa que para el caso de la repetitividad de los resultados del procesamiento con la constelación GLONASS, en algunas estaciones estos son superiores a los límites de tolerancia predefinidos. Por lo que es posible concluir que 10 de las 15 estaciones procesadas tienen soluciones con repetitividad mayor al rango sugerido en esta investigación.

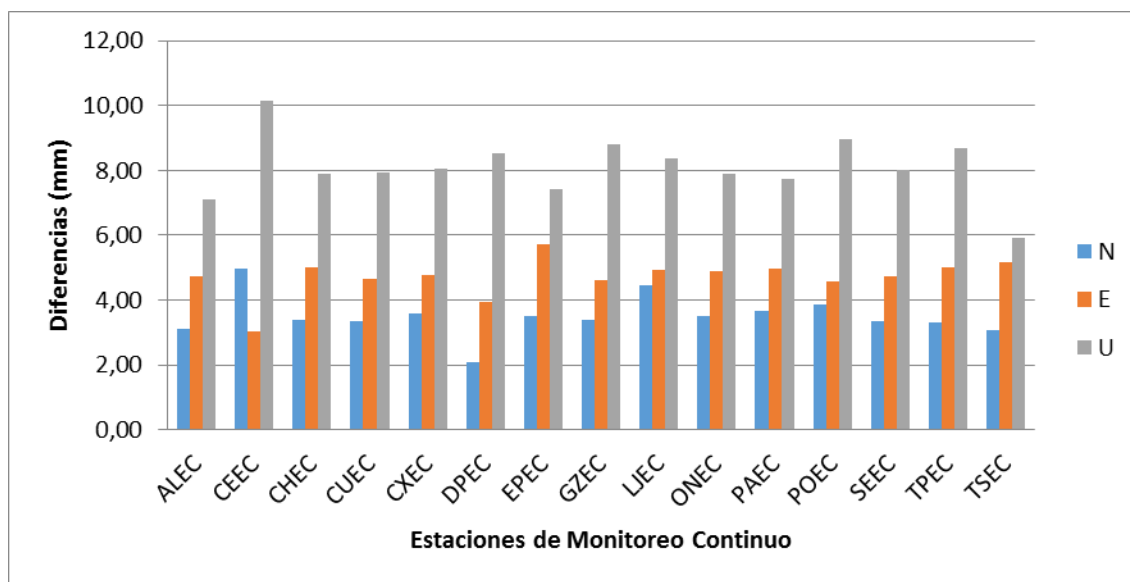
Para las estaciones, que tienen valores medios superiores a los recomendados, se debe a las causas previamente explicadas (modelos de corrección exclusivos para la constelación GPS), adicionalmente se puede decir que, por su repetitividad, tienen magnitudes relativamente similares. Las diferencias probablemente se deban a procesos comunes, como el proceso de materialización de soluciones, o procesos relacionados con fenómenos físicos. Estos fenómenos solo pueden ser identificados después de su corrección mediante la implementación de un modelo de corrección particular.

Repetitividad media por estaciones, de los resultados del procesamiento de los datos GNSS con la constelación GPS, en el software Bernese 5.2

Tabla 24

Resultados estadísticos de las repetitividades por estaciones procesadas, con la constelación GPS, en el software Bernese 5.2

Nº	Estación	Norte Media (mm)	Este Media (mm)	Altitud Media (mm)
1	ALEC	3,11	4,72	7,09
2	CEEC	4,96	3,02	10,14
3	CHEC	3,39	5,01	7,88
4	CUEC	3,35	4,67	7,95
5	CXEC	3,60	4,76	8,05
6	DPEC	2,10	3,93	8,53
7	EPEC	3,51	5,71	7,43
8	GZEC	3,40	4,61	8,79
9	LJEC	4,46	4,95	8,36
10	ONEC	3,52	4,90	7,88
11	PAEC	3,66	4,98	7,72
12	POEC	3,88	4,57	8,96
13	SEEC	3,35	4,75	8,02
14	TPEC	3,33	5,01	8,70
15	TSEC	3,08	5,17	5,92
	Media	3,51	4,72	8,10
	Máximo	4,96	5,71	10,14
	Mínimo	2,10	3,02	5,92

Figura 32*Repetitividad media de las soluciones*

De acuerdo con los resultados expuestos, es posible ultimar que las 13 de las 15 estaciones procesadas en el software Bernese, poseen soluciones con repetitividad de acuerdo con el rango sugerido en esta investigación, 2 estaciones presentan valores escasamente superiores al límite permisible, como es el caso de las estaciones CHEC y EPEC, situación que se puede adjudicar a la ubicación geográfica y factores meteorológicos, donde se encuentran ubicadas.

Comparación de las soluciones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS.

Los softwares de procesamiento de datos GNSS de carácter científico (GAMIT/GLOBK y Bernese), desempeñan un papel importante en estudios que requieren alta precisión, donde es fundamental e indispensable tener repetitividad de posiciones y soluciones que ayudarán a representar los RMS de posicionamiento. Es importante considerar que cada software presenta diferentes tipos y estrategias de procesamiento, por lo que, a pesar de existir un delgado margen de diferencia en los productos resultantes presentados por los paquetes informáticos utilizados, estos se encuentran dentro de los límites expuestos durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A continuación, en la Tabla 25 se expone un extracto de la media aritmética \bar{x} , de las precisiones de las coordenadas cartesianas GPS y coordenadas cartesianas GLONASS, producto del procesamiento en el software Bernese y GAMIT/GLOBK. Se puede dilucidar que las precisiones en el software Bernese no alcanzan el milímetro, mientras que las del paquete informático GAMIT/GLOBK son de mayor magnitud, esto se puede deber a diferentes factores; como la connotación de cada software, Bernese al ser un programa de computador desarrollado por geodestas; en los resultados se muestra más preciso y GAMIT/GLOBK que es desarrollado por astrónomos refleja precisiones más altas, dado que su campo de aplicación es distinto y más amplio.

Las precisiones alcanzadas en la materialización de las coordenadas de los datos GNSS en los dos softwares científicos, indican que Bernese tiene una mayor precisión, sin embargo, esto es de carácter subjetivo ya que en la realidad alcanzar al tener como resultado precisiones inferiores al milímetro; resulta una apología, por lo tanto, GAMIT/GLOBK refleja precisiones más apegadas a la realidad.

La tabla completa de la comparación entre softwares se encuentra en el ANEXO G del presente trabajo de investigación.

Tabla 25

Media aritmética de las precisiones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS

semana GPS	ALEC BERNESE						ALEC GAMIT/GLOBK					
	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ X(m)	σ Y(m)	σ Z(m)
2091	1233231.833	-6255435.557	-243534.457	0.00070	0.00097	0.00046	1233231.86	-6255435.59	-243534.46	0.0030	0.0090	0.0020
2092	1233231.829	-6255435.553	-243534.451	0.00070	0.00096	0.00047	1233231.86	-6255435.6	-243534.46	0.0030	0.0090	0.0020
2093	1233231.826	-6255435.532	-243534.454	0.00068	0.00095	0.00044	1233231.86	-6255435.59	-243534.46	0.0020	0.0070	0.0010
2094	1233231.823	-6255435.546	-243534.454	0.00070	0.00098	0.00047	1233231.86	-6255435.59	-243534.47	0.0030	0.0100	0.0020
2095	1233231.823	-6255435.544	-243534.448	0.00070	0.00097	0.00046	1233231.86	-6255435.6	-243534.46	0.0150	0.0630	0.0140
2096	1233231.822	-6255435.545	-243534.459	0.00071	0.00099	0.00046	1233231.85	-6255435.6	-243534.46	0.0010	0.0040	0.0010
2097	1233231.829	-6255435.556	-243534.454	0.00074	0.00010	0.00048	1233231.85	-6255435.59	-243534.46	0.0030	0.0090	0.0020
2098	-	-	-	-	-	-	1233231.85	-6255435.580	-243534.46	0.0030	0.0100	0.0020
2099	1233231.833	-6255435.551	-243534.442	0.00070	0.00096	0.00046	1233231.85	-6255435.6	-243534.46	0.0030	0.0090	0.0020
2100	1233231.829	-6255435.547	-243534.452	0.00019	0.00096	0.00045	1233231.86	-6255435.6	-243534.46	0.0020	0.0070	0.0020
2101	1233231.839	-6255435.561	-243534.460	0.00072	0.00099	0.00047	1233231.85	-6255435.6	-243534.46	0.0010	0.0040	0.0010
2102	1233231.824	-6255435.537	-243534.464	0.00070	0.00098	0.00047	1233231.86	-6255435.59	-243534.46	0.0020	0.0090	0.0020
2103	1233231.826	-6255435.553	-243534.461	0.00069	0.00098	0.00046	1233231.85	-6255435.59	-243534.46	0.0020	0.0090	0.0020
			\bar{x}	0.00066	0.00090	0.00046			\bar{x}	0.0033	0.0122	0.0027

Nota. La Tabla muestra los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS de la REGME, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Las fases establecidas para el desarrollo de la metodología del presente proyecto, han permitido generar coordenadas geocéntricas en el marco de referencia IGS14 y tras el análisis estadístico realizado al procesamiento de los datos GNSS, de las 15 estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME, y su posterior materialización de soluciones semanales se llegó a concluir; que los softwares científicos GAMIT/GLOBK 10.7 y Bernese 5.2 para el procesamiento de estos datos otorgan precisiones en el orden del milímetro. La diferencia entre precisiones alcanzadas es mínima y comparando los resultados obtenidos con las soluciones oficiales de SIRGAS se concluye que el procesamiento y posterior materialización de soluciones se encuentran dentro de los límites establecidos para esta investigación.

Previo al procesamiento de los datos GNSS es requisito fundamental definir los parámetros y modelos adecuados para cada caso de procesamiento. Para la constelación satelital GPS, tanto en el software GAMIT/GLOBK 10.7 como Bernese 5.2 se cuentan con modelos de corrección diseñados exclusivamente para esta constelación, mismos que permitan minimizar al máximo los errores de posicionamiento, otorgando así mejores resultados en el procesamiento de datos. Para la materialización de soluciones con la constelación satelital GLONASS, realizada en el software GAMIT/GLOBK, los modelos y parámetros que este software tiene disponibles no son propios de esta constelación, por lo tanto, los modelos que se emplean para el procesamiento de datos GNSS con

GLONASS son los mismos que los usados para GPS, lo que influye directamente en los niveles de precisión alcanzados para la materialización de soluciones.

Una vez materializadas las soluciones semanales, se concluye que no existe una diferencia significativa en cuanto a las precisiones alcanzadas, tanto en el procesamiento de datos GPS como GLONASS en los dos paquetes informáticos empleados. La materialización de soluciones con la constelación GLONASS arroja menores niveles en cuanto a precisión para datos GNSS de la REGME, una de las causas de esto se fundamenta en la conclusión previamente descrita. La media de diferencia entre GPS y GLONASS, para la presente campaña de procesamiento es de 4.44 mm (N), 2.94 mm (E) y 7.18 (U) mm.

Analizando los resultados en las tablas previamente expuestas, se concluye que la precisión externa del procesamiento de datos GPS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, comparados con las soluciones semanales oficiales de SIRGAS, se encuentran dentro de los parámetros de control definidos para esta investigación, tanto para coordenadas cartesianas como para locales topocéntricas (ENU).

Para la comparación de softwares se determinó que no existe una diferencia significativa entre uno y otro en cuanto a las precisiones alcanzadas en la materialización de soluciones semanales, no obstante se pudo evidenciar durante la investigación, que el número de estaciones fiduciales empleadas (nueve), permitió alcanzar mejores precisiones en GAMIT/GLOBK que en Bernese, lo que sugiere que el primer programa mencionado, realiza un mejor ajuste de parámetros y observaciones con el número de estaciones fiduciales mencionadas. Así mismo, se puede concluir que el software Bernese para alcanzar mejores precisiones necesita mayor número de estaciones base.

Ambos softwares al ser de carácter científico permiten corregir los posibles errores de posicionamiento, que se pueden presentar durante el rastreo de datos GNSS, sin embargo, la diferencia en las precisiones alcanzadas entre un paquete informático y otro se da principalmente durante la ejecución del procesamiento, se evidenció que el software GAMIT/GLOBK considera los errores de los diferentes modelos usados y así mismo considera los errores producidos por aquellas causas que no se pueden modelar durante toda la etapa de procesamiento, el software Bernese considera estos errores mencionados únicamente en la parte final del ajuste de red de las coordenadas (procesamiento), de ahí que la precisión obtenida en este último software durante el ajuste sea demasiado optimista y la dispersión se encuentre por encima del error.

Para el análisis de la precisión externa, en la cual se compararon las soluciones semanales de la constelación GPS, procesadas en ambos softwares, con las soluciones oficiales semanales de SIRGAS, se concluye que los ΔX , ΔY & ΔZ , no superan los 10 cm de diferencia en cuanto a la comparación entre coordenadas cartesianas; razón por la cual se aceptan los resultados obtenidos.

Las semanas de procesamiento 2093 y 2098, son las que mayores valores ΔX , ΔY & ΔZ arrojan, principalmente en la componente Y; lo que puede indicar que existieron anomalías en el rastreo de datos durante estas semanas. Cabe subrayar que estos valores no superan los límites, por lo que no se ve alterada de manera significativa los resultados de la campaña de procesamiento, esto se puede evidenciar en las tablas de precisión interna presentadas.

En cuanto a la precisión interna, en la cual se analiza la serie de residuos para cada una de las componentes de las estaciones, mismos que no deben superar los 5mm para norte y este y 15 mm para sur, se evidenció que para el procesamiento de datos con la constelación GPS y con ambos softwares empleados no superan los límites descritos,

lo que se traduce en una precisión interna óptima. Para el caso de la constelación GLONASS, en la cual se alcanzaron repetitividades de 5.59 mm (E), 3.84 mm (N) y 9.69 (U) mm; se evidencia que para una de las componentes (E) el RMS alcanzado supera el límite establecido, lo que indica que la repetitividad de datos con esta constelación arroja menores precisiones.

Recomendaciones

Pese a que, en el presente estudio no se obtuvieron como resultados diferencias significativas, en la fase de ajuste y posterior materialización de soluciones, con las constelaciones y software empleados; se recomienda emplear diferentes estrategias de procesamiento de datos GNSS, en las cuales se obtengan soluciones, que sean producto de la combinación de constelaciones satelitales como GPS+GLONASS, para su posterior análisis.

El software GAMIT/GLOBK a diferencia del software Bernese, permite ejecutar el procesamiento de datos GNSS con la constelación satelital GALILEO, por lo que se recomienda realizar un estudio y posterior comparación con los resultados del presente en lo referente a la materialización de soluciones. Así mismo se debería realizar combinaciones de constelaciones satelitales, ya que este software otorga estas posibilidades (GPS+GLONASS, GPS+GALILEO, GLONASS+GALILEO, entre otras)

Uno de los inconvenientes en la realización del presente proyecto; fue la obtención de los insumos y archivos de entrada. La falta de actualización en los archivos principales (log.files, info.station); generan conflictos y retrasos en el procesamiento de datos GNSS

de la REGME, por lo que se recomienda realizar una actualización detallada de la información que es compartida entre el Instituto Geográfico Militar (IGM) y SIRGAS.

Si bien es cierto, en el presente estudio se evidenció que no existe una diferencia significativa en cuanto a las precisiones alcanzadas entre el un software y otro y de la misma manera con las constelaciones, se recomienda aumentar el numero de estaciones procesadas y el numero de estaciones fiduciales inmersa en la campaña de procesamiento. Es importante mencionar que los resultados alcanzados son aceptables en cuanto a materialización de una red local y nacional, sin embargo, si el objetivo que se persigue es implementar un Marco de Referencia se debe considerar el estudio de cada uno de los modelos y parámetros de corrección utilizados en le procesamiento de datos GNSS; ya que esto permitirá una óptima compensación de errores.

Las soluciones semanales SIRGAS, que se encuentran de libre acceso en el geoportal del IGM, tardan en ser subidas aproximadamente un mes, no obstante, podrían ser calculadas con un tiempo menor de retraso si se utilizan efemérides rápidas. A causa de este factor, en el desarrollo del presente trabajo de titulación, se desarrollaron en calidad de ANEXOS, manuales de instalación y procesamiento de datos GNSS en los softwares científicos GAMIT/GLOBK 10.7 y Bernese 5.2, por lo que se recomienda utilizarlos, para dar servicio a la comunidad geodésica universitaria, con el cálculo de las soluciones semanales de las estaciones de la REGME, las cuales podrían ser subidas a un portal de la ESPE en un lapso de tiempo considerablemente menor al de SIRGAS.

Referencias Bibliográficas

- Agnew, D., & Larson, K. (2007). Finding the repeat times of the gps constellation. *GPS Solutions*, 11, 105. <https://doi.org/10.1007>
- Alves, H. (2009). *AVALIAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS NO POSICIONAMENTO GNSS*.
- Andrade, S. (2012). *CÁLCULO DE COORDENADAS DE ALTA PRECISIÓN MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT/GLOBK EN LÍNEAS MAYORES A 100 KM*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Balsa, J. (2014). *Aplicación de sistemas GNSS y SIG a infraestructuras de transporte. Estudio sobre conducción naturalista*. Universidade da Coruña.
- Barrazo, B., & Tarrío, J. (2020). *Procesamiento de datos GNSS con software libre, a partir de estaciones SIRGAS*.
- Berné, J. L., Garrido, N., & Capilla, R. (2019). *GNSS: GPS, GLONASS , BEIDOU Fundamentos y métodos de posicionamiento*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Boucher, C., Altamimi, Z., Feissel, M., & Sillard, P. (1996). *Results and Analysis of the ITRF94*. 26(4), 551–556.
- Camargo, P. (1992). *Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman*. Universidade Federal do Paraná.
- Cisneros, D. (2014). *Procesamiento científico ecuatoriano de datos GPS generados por estaciones permanentes ubicadas en países de la región SIRGAS*. 1–14. http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?wpfb_dl=66

- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2 Tutorial* (p. 148).
- Department Of Defense USA, D. (2020). *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. <https://www.gps.gov/technical/ps/>
- Díaz, J. (2019). Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso. (PPP: Precise Point Positioning). *Salamanca*.
- European GNSS Service, C. (2018). *BERNESE GNSS Software (from Bern University)*.
- Fárez, C. (2010). *IMPLANTACIÓN DE UNA ESTACIÓN PERMANENTE GNSS EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULA DE LOJA*.
- Floyd, M. (2020). *GAMIT/GLOBK*.
- Hegarty, C. J., & Chatre, E. (2008). This growing civil aviation system is expected to replace a significant number of ground based navigation systems and allow for more efficient use of the world wide airspace. *Proceedings of the IEEE*, 96(12), 1902–1917. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006090>
- Hernandez, M., Sornoza, J., & Suribana, J. (2001). Procesado de Datos GPS: Código y Fase. Algoritmos, Técnicas y Recetas. *Dialnet*, 33.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C., & Sciences, P. (2018). GAMIT Reference manual 10.6. *Control*, June, 1–168.
- Herring, T., King, R., Floyd, M., & McClusky, S. (2018a). *Introduction to GAMIT/GLOBK* (Issue June).
- Herring, T., King, R., Floyd, M., & McClusky, S. (2018b). *Introduction to GAMIT/GLOBK*. June, 31–32. http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro_GG.pdf
- ICAO. (2007). Annex 10 to the Convention of International Civil Aviation, Montreal. *Radio*

Navigation Aids, 1.

- Instituto Geográfico Militar. (2013). Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador – REGME. *Igm*, 1–6. http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?page_id=207
- Jiménez, S., González, M. B., Ramírez, J. J., & Medina, H. (2018). Cálculo de coordenadas GPS con software libre, comercial y procesos online, utilizando órbitas rápidas en intervalos estáticos cortos y largos. *Geos*, 38(2).
- Kaniuth, K., & Völksen, C. (2003). *Comparison of the BERNESE and GIPSY/OASIS II Software Systems* (Geodätisch).
- León, F. (2021). *RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR – REGME*. http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?page_id=283
- Li, X., Li, X., Yuan, Y., Zhang, K., Zhang, X., & Wickert, J. (2018). Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo. *Journal of Geodesy*, 92(6), 579–608. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1081-3>
- López, D., & Negrete, D. (2016). *Obtención de coordenadas precisas de estaciones de monitoreo continuo y simulación sísmica para detección de movimientos rápidos*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Martín, A. (2020). *Sistemas De Referencia Geodesicos*. 41–42. https://www.researchgate.net/publication/343627274_4-SISTEMAS_DE_REFERENCIA_GEODESICOS
- 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>

Montenegro, G. (2005). Introducción al Filtro Kalman. *Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas*, 31–33.

Orozco, F., Villa, R., Guzmán, L., & Chango, W. (2020). ANÁLISIS PARA LA CORRECCIÓN DE ERRORES EN LA SEÑAL GPS. *Open Journal Systems En Revista: REVISTA DE ENTRENAMIENTO*, 6(3), 24–42.

Pilapanta, Christian. (2013). *Estudio metodológico de la dinámica espacial de la estación de monitoreo continuo Riobamba (RIOP) y su influencia en la determinación del modelo de velocidades del Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Pilapanta, Christian. (2018). AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO EFEITO DE CARGA POR PRESSÃO ATMOSFÉRICA EM POSICIONAMENTO GPS DE ALTA PRECISÃO NAS REGIÕES DO EQUADOR CONTINENTAL E DA AMAZÔNIA BRASILEIRA. In *Biomass Chem Eng*.

Pilapanta, Crhristian. (2013). *Estudio metodológico de la dinámica espacial de la Estación de Monitoreo Continuo Riobamba (RIOP) y su influencia en la determinación del modelo de velocidades del Ecuador*.

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.*, 174. <http://www.oocities.org/es/forogps/infografia/gps5.pdf>

Rebischung, P., & Schimd, R. (2016). IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>

- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. *Geophysical Monograph Series*, 15, 42–62.
<https://doi.org/0065-8448>
- Sanchez, L. (2013). *Instalación y configuración Bernese GNSS Software versión 5.2, según estándares de procesamiento SIRGAS*.
- Sanchez, L. (2017). *Guía para los Centros de Análisis SIRGAS*. 2017, 62–64.
<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/guidelines/>
- Serpas, J. G., Ramírez, M., & Obaldía, F. (2004). El sistema de posicionamiento global. *Uniciencia*, 21(1), 27–35.
- Sevilla, M. J. (1987). INSTITUTO DE ASTRONOMIA y GEODESIA. *Boletino DI Geodesia E Scienze*, 1(January 1990), 1–285.
https://www.researchgate.net/profile/Miguel_Sevilla/publication/277670203_On_the_Optimal_Choice_of_the_Standard_Parallels_for_a_Conformal_Conical_Projection/links/55f9b90d08aec948c495f3c2/On-the-Optimal-Choice-of-the-Standard-Parallels-for-a-Conformal-Con
- SIRGAS. (2017). *Guía para los Centros de Análisis SIRGAS* (Vol. 2017).
<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/guidelines/>
- Vicaflor, J. L. (2008). MARCOS DE REFERENCIA Y PARAMETROS DE TRANSFORMACION EN SOLUCIONES OPTIMAS DE LA COMPENSACION DE UNA RED GEODESICA LIBRE. *Mecánica Computacional*, XXVII, 2861–2873.
- Zhu, N., Marais, J., Betaille, D., & Berbineau, M. (2018). GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(9), 2762–2778.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2766768>

ANEXOS