

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Monitoreo de la Integridad de las Observaciones de la Estación de Referencia de Operación Continua de la Facultad de Ingeniería

T E S I S

que para obtener el título de:

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A :

José Angel Tapia Toledo

TUTOR

Dr. Roberto René Manzano Islas



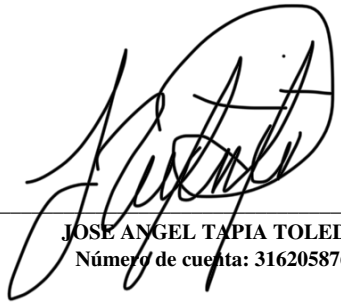
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado MONITOREO DE LA INTEGRIDAD DE LAS OBSERVACIONES DE LA ESTACION DE REFERENCIA DE OPERACION CONTINUA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA que presenté para obtener el titulo de INGENIERO GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



JOSE ANGEL TAPIA TOLEDO
Número de cuenta: 316205876

Dedicatoria ...

Esta tesis está dedicada a mi madre, por ser la persona más importante en mi vida. Sin su apoyo y esfuerzo, no habría podido llegar hasta aquí. A mi hermana, a quien siempre tengo presente y quien forma parte esencial de la persona que soy. Y a todas aquellas personas que me acompañaron a lo largo de este camino y que, de una u otra manera, contribuyeron a que hoy pudiera llegar hasta aquí.

Agradecimientos

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA103526 "Aprendizaje de máquina aplicado al monitoreo de la integridad de la Estación de Referencia de Operación Continua (CORS) de la Facultad de Ingeniería".

Al Dr. René Manzano, por acompañarme y apoyarme durante este proceso; sin su guía, paciencia y dedicación, este trabajo no habría sido posible.

A todos mis profesores, por compartir conmigo sus conocimientos y aconsejarme a lo largo de mi formación profesional. Siempre los tendré presentes.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme brindado la oportunidad de formar parte de su comunidad y por todas las experiencias y oportunidades que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal.

A mis amigos Arleth, Karla, Alexis, Alejandro, Gerardo y Jorge que con su apoyo, cariño, consejos y risas hicieron más amena mi estancia en la facultad.

A Armando, David, Jaime y Samuel, por ser una familia para mí, por las experiencias compartidas y por acompañarme en todo momento.

Se reconoce el uso del software **GIPSY/GipsyX**, desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, para el procesamiento PPP de las observaciones GNSS empleadas en este trabajo. El acceso al software se realizó bajo una licencia académica, lo que permitió obtener productos de procesamiento preciso, incluyendo residuales de pseudorango, residuales de fase portadora y soluciones de posición utilizadas para el análisis de calidad de la estación CORS FICU. Asimismo, se reconoce la importancia de **GIPSY/GipsyX** como herramienta especializada para aplicaciones

de geodesia espacial, posicionamiento preciso y análisis de observaciones GNSS [1].

Resumen

En la presente tesis se calcularon y analizaron diversos indicadores para el monitoreo de la calidad de las observaciones GNSS registradas en la estación de referencia de operación continua **CORS** FICU, ubicada en el edificio B del Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería, en Ciudad Universitaria, alcaldía Coyoacán, Ciudad de México.

Los indicadores considerados están directamente relacionados con la calidad de la señal recibida por la estación. Entre ellos se incluyen la relación señal-ruido, los efectos de multicamino, la disponibilidad de datos, la geometría satelital, la salud de los satélites y los residuales de las observaciones de pseudorango y fase portadora. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento de la estación y detectar posibles degradaciones en la calidad de los datos GNSS.

Los principales programas utilizados en este trabajo fueron **TEQC**, desarrollado por **UNAVCO**, y **G-Nut/Anubis**, desarrollado por **G-Nut Software**. Ambas herramientas permitieron realizar el control de calidad de las observaciones GNSS registradas por la estación CORS FICU durante un periodo de **7 días**, comprendido entre el 20 y el 26 de mayo de 2026. Para el procesamiento mediante TEQC se utilizaron archivos **RINEX 2.11**, con un intervalo de registro de **15 segundos entre épocas**, mientras que para G-Nut/Anubis se emplearon archivos **RINEX 3.04**, con un intervalo de **1 segundo entre épocas**. Estas herramientas permitieron obtener indicadores asociados con la disponibilidad de observaciones, la relación señal-ruido, el efecto multicamino, los saltos de ciclo y la geometría satelital, entre otros parámetros relevantes para la evaluación de estaciones CORS.

Adicionalmente, se utilizó el software **GIPSY/GipsyX**, desarrollado por el Jet

Propulsion Laboratory (JPL) de la **National Aeronautics and Space Administration** (**NASA**), para realizar un procesamiento mediante posicionamiento puntual preciso (PPP) y obtener los residuos de pseudorango y fase portadora correspondientes a un día completo de observaciones [1].

Posteriormente los valores obtenidos fueron analizados estadísticamente con el objetivo de identificar posibles observaciones anómalas y evaluar el comportamiento general de la estación durante el periodo de estudio. La metodología presentada en esta tesis es replicable para el monitoreo de calidad de cualquier estación CORS, siempre que se cuente con observaciones GNSS continuas y con los productos necesarios para su procesamiento.

Índice general

Agradecimientos II

Resumen IV

1. Introducción 1

1.1. Planteamiento del problema 1

1.2. Objetivos específicos 2

1.3. Hipótesis y alcances de la tesis 3

1.3.1. Alcances de la tesis 3

1.4. Estado del arte 4

2. Calidad e integridad de los datos GNSS 9

2.1. Sistema Global de Navegación por Satélite 10

2.1.1. Segmentos del GNSS 10

2.2. Errores en el GNSS 13

2.3. Métodos de posicionamiento en el GNSS 13

2.3.1. Posicionamiento puntual simple 14

2.3.2. Posicionamiento puntual preciso 15

2.3.3. Posicionamiento diferencial 17

2.3.4. Posicionamiento cinemático en tiempo real 19

2.4. Resolución de ambigüedades de fase portadora 20

2.5. Correcciones para RTK y Posicionamiento Puntual Preciso 22

2.5.1. Correcciones orbitales 22

2.5.2. Correcciones de reloj 23
2.5.3. Correcciones atmosféricas 24
2.5.4. Sesgos de código y fase 31
2.6. Fundamentos de integridad de las observaciones GNSS 31
2.7. Indicadores de calidad de las observaciones 34
2.7.1. Indicadores de multicamino 34
2.7.2. Relación señal-ruido 35
2.7.3. Residuales de pseudorango en procesamiento PPP 36
2.7.4. Residuales de fase portadora en procesamiento PPP 37
2.7.5. Combinación libre de ionosfera como indicador de calidad . . . 38
2.7.6. Derivada del efecto ionosférico con respecto al tiempo 38
2.7.7. Ángulo de elevación y azimut de los satélites 38
2.8. Algoritmo para la detección de anomalías 42

3. Metodología para el monitoreo de los datos GNSS 47
3.1. Descripción de la estación CORS de la Facultad de Ingeniería 48
3.2. Datos GNSS analizados 48
3.2.1. Archivos RINEX 49
3.2.2. Preparación y unión de archivos RINEX 50
3.3. Software de procesamiento utilizado 52
3.3.1. TEQC 52
3.3.2. G-Nut/Anubis 53
3.3.3. GIPSY/GipsyX 54
3.4. Flujo general de procesamiento 55

4. Análisis de los resultados 57
4.1. Resultados obtenidos con TEQC 58
4.1.1. Azimut y elevación 58
4.1.2. Combinación libre de ionosfera 61
4.1.3. Variación temporal de la combinación libre de ionosfera 63
4.1.4. Indicadores de multicamino 64

4.1.5. Relación señal-ruido 66
4.1.6. Disponibilidad y continuidad de la estación 67
4.1.7. Detección de saltos de ciclo 68
4.2. Control de calidad con G-Nut/Anubis 70
4.2.1. Configuración del procesamiento 70
4.2.2. Número de satélites y geometría de posicionamiento 71
4.2.3. Estabilidad de la solución de posición 72
4.2.4. Distribución espacial de los satélites 73
4.2.5. Relación señal-ruido por constelación y señal 75
4.2.6. Análisis de multicamino por constelación y señal 77
4.2.7. Salud satelital y redundancia de observaciones 78
4.2.8. Síntesis del control de calidad con G-Nut/Anubis 79
4.3. Procesamiento PPP con GIPSY/GipsyX 80
4.3.1. Residuales de pseudorango obtenidos con GIPSY/GipsyX . . . 80
4.3.2. Residuales de fase portadora obtenidos con GIPSY/GipsyX . 83
4.4. Detección de anomalías 85

5. Conclusiones y trabajo a futuro **89**
5.1. Conclusiones 89
5.2. Recomendaciones y trabajo a futuro 91

6. Glosario de términos **93**

Índice de figuras

2.1. Sistema de coordenadas geocéntrico terrestre ECEF. 40
2.2. Sistema de coordenadas topocéntrico local. 41
2.3. Distribución normal estándar y límites basados en percentiles para la detección de valores extremos. 45
2.4. Ejemplo de histograma de un indicador GNSS normalizado y límites percentilares para la identificación de anomalías. 45

3.1. Ejemplo de comando utilizado con **GFZRNX** para unir los archivos RINEX analizados. 51
3.2. Ejemplo de reporte generado por **TEQC** para el análisis de calidad de archivos RINEX 2.11. 53

4.1. Elevación de los satélites observados durante los siete días analizados con **TEQC**. 58
4.2. Gráfica de cielo de los satélites observados durante los siete días analizados con **TEQC**. 59
4.3. Series de tiempo de elevación de los satélites observados por constelación. 60
4.4. Mapa tiempo-satélite de la combinación libre de ionosfera para las frecuencias L1 y L2. 61
4.5. Series de tiempo de la combinación libre de ionosfera para los satélites observados por constelación. 62
4.6. Variación temporal de la combinación libre de ionosfera para los satélites observados por constelación. 64

4.7. Series de tiempo de los indicadores de multicamino para las constelaciones GPS, GLONASS y Galileo. 65
4.8. Serie de tiempo de los valores de SNR en la frecuencia L1 para los satélites de la constelación GPS. 67
4.9. Número de satélites observados durante el periodo de análisis obtenido con **G-Nut/Anubis**. 72
4.10. Variación temporal de los valores DOP obtenidos durante el procesamiento con **G-Nut/Anubis**. 72
4.11. Variación relativa de las componentes cartesianas de posición obtenidas con **G-Nut/Anubis**. 73
4.12. Variación relativa de la altura durante el periodo de análisis. 73
4.13. Gráfica de cielo general obtenida a partir de los resultados de **G-Nut/Anubis**. 74
4.14. Mapa tiempo-satélite de elevación durante el periodo analizado. . . . 75
4.15. Promedio de SNR por señal y constelación obtenido con **G-Nut/Anubis**. 76
4.16. Mapa tiempo-satélite de SNR para la señal S1C. 76
4.17. Promedio de multicamino por señal y constelación obtenido con **G-Nut/Anubis**. 77
4.18. Mapa tiempo-satélite del indicador de multicamino para la señal M1C. 78
4.19. Indicador promedio de salud satelital por satélite obtenido con **G-Nut/Anubis**. 79
4.20. Indicador promedio de redundancia satelital por satélite obtenido con **G-Nut/Anubis**. 79
4.21. Residuales de pseudorango obtenidos mediante procesamiento PPP con coordenadas fijas. 81
4.22. Distribución de los residuales de pseudorango obtenidos con **GIPSY/GipsyX**. 82
4.23. Residuales de pseudorango en función de la elevación satelital. 82
4.24. Residuales de fase portadora obtenidos mediante procesamiento PPP con coordenadas fijas. 83
4.25. Distribución de los residuales de fase portadora obtenidos con **GIPSY/GipsyX**. 84

4.26. Residuales de fase portadora en función de la elevación satelital. . . . 84

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se introduce el trabajo desarrollado en esta tesis. Primero, se plantea el problema asociado con el monitoreo de la calidad de las observaciones GNSS en una estación de referencia de operación continua. Posteriormente, se establecen los objetivos específicos, la hipótesis y los alcances de la investigación. Finalmente, se presenta el estado del arte, en el cual se describen trabajos relacionados con la evaluación de calidad de datos GNSS en estaciones CORS.

1.1. Planteamiento del problema

La instalación de una estación de referencia GNSS de operación continua, conocida como **CORS** por sus siglas en inglés *Continuously Operating Reference Station*, requiere de un sistema de monitoreo recurrente de las observaciones que registra, con el fin de asegurar la calidad de los datos y la integridad del posicionamiento derivado de ellos. En el caso de la estación CORS instalada en la Facultad de Ingeniería, resulta necesario contar con una metodología que permita evaluar de forma sistemática el comportamiento de las observaciones GNSS y detectar posibles anomalías.

Actualmente, no se cuenta con un sistema automatizado de monitoreo de la calidad de las observaciones GNSS generadas por la estación. Esta situación dificulta la detección oportuna de problemas relacionados con efectos de multicamino, pérdida de señal, disminución de la relación señal-ruido, saltos de ciclo y valores atípicos en los

residuales de fase portadora y pseudorango. Estos efectos pueden degradar la calidad de las observaciones y afectar la confiabilidad de las soluciones de posicionamiento obtenidas a partir de la estación.

Por esta razón, resulta necesario desarrollar una metodología capaz de realizar un análisis automatizado de la calidad de las observaciones GNSS. Para ello, se consideran indicadores como el multicamino en las combinaciones *MP1* y *MP2*, la relación señal-ruido *SNR*, la elevación y el azimut de los satélites observados, así como los residuales de fase portadora y pseudorango. El análisis conjunto de estos parámetros permite evaluar el desempeño de la estación CORS instalada en la Facultad de Ingeniería y contribuir a la integridad de las posiciones calculadas utilizando dicha estación como base.

1.2. Objetivos específicos

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar una metodología para el monitoreo de la calidad de las observaciones GNSS registradas por la estación CORS de la Facultad de Ingeniería. La metodología propuesta busca ser replicable y adaptable para el análisis de otras estaciones GNSS de operación continua. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Calcular los indicadores *MP1*, *MP2* y *SNR* mediante **TEQC**, así como automatizar el procedimiento de extracción y análisis.
- Calcular indicadores de calidad mediante **G-Nut/Anubis**, incluyendo parámetros relacionados con multicamino, relación señal-ruido, elevación, azimut, disponibilidad de observaciones y salud satelital.
- Graficar y analizar los indicadores obtenidos para un periodo determinado de observación.
- Calcular los residuales de fase portadora y pseudorango mediante **GIPSY/GipsyX**.

- Automatizar la generación de gráficas de series de tiempo para los parámetros calculados.
- Desarrollar y aplicar criterios estadísticos para la detección de valores atípicos y posibles observaciones anómalas.

1.3. Hipótesis y alcances de la tesis

Se espera que los datos registrados por una estación de referencia de operación continua (CORS), instalada en condiciones favorables de recepción, caracterizadas por una adecuada visibilidad del cielo y una baja presencia de obstáculos y superficies reflectantes, presenten indicadores de calidad compatibles con un seguimiento estable de las señales GNSS. Como referencia, en la literatura se han reportado criterios de calidad para estaciones CORS, entre ellos valores medios de multicamino MP1 y MP2 inferiores a 0.30 m, de acuerdo con recomendaciones del IGS de 2015 citadas en [5]. Este valor constituye un antecedente técnico sobre las condiciones esperadas de observación y no un umbral de clasificación utilizado en la presente investigación.

La hipótesis de esta tesis establece que, mediante el cálculo automatizado y el análisis estadístico de indicadores de calidad GNSS, es posible identificar comportamientos estadísticamente extremos en las observaciones registradas por una estación CORS. Estos comportamientos pueden estar asociados con ruido de medición, efectos de multicamino, pérdida de seguimiento, baja relación señal-ruido, saltos de ciclo o residuos atípicos. Por lo tanto, una metodología basada en indicadores de calidad permite apoyar el monitoreo de la estación y contribuir a la evaluación de la confiabilidad de los datos generados.

1.3.1. Alcances de la tesis

El presente trabajo desarrolla una metodología para monitorear la calidad de las observaciones GNSS de la estación CORS FICU. Para ello, se automatiza el uso de programas especializados en control de calidad y procesamiento GNSS, tales como

TEQC, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX**. A partir de estas herramientas se calculan indicadores relacionados con multicamino, relación señal-ruido, disponibilidad de datos, geometría satelital, salud de los satélites, residuales de pseudorango, residuales de fase portadora y variaciones de posición.

Queda fuera del alcance de esta tesis realizar un monitoreo ionosférico detallado o un diagnóstico específico de fallas de hardware del receptor o de la antena. Asimismo, no se analizan de forma independiente las correcciones precisas utilizadas internamente por **GIPSY/GipsyX** para el procesamiento PPP, tales como órbitas, relojes satelitales o modelos atmosféricos. En este trabajo, el procesamiento PPP se utiliza principalmente como medio para obtener residuales de observación y analizar su comportamiento como indicadores de calidad.

1.4. Estado del arte

En los últimos años, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, conocidos como **GNSS** por sus siglas en inglés *Global Navigation Satellite Systems*, han adquirido una gran relevancia en aplicaciones geodésicas, topográficas, científicas y de navegación. Este crecimiento se refleja en el incremento del número de estaciones de operación continua a nivel mundial, así como en la disponibilidad de múltiples constelaciones satelitales, tales como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.

Las estaciones de referencia de operación continua, o **CORS**, representan un elemento fundamental de la infraestructura geoespacial de los países, ya que proporcionan observaciones GNSS continuas que pueden utilizarse para posicionamiento preciso, monitoreo geodinámico, control geodésico y generación de correcciones diferenciales. Por esta razón, la calidad de los datos registrados por estas estaciones es un aspecto esencial para garantizar la confiabilidad de los productos derivados de ellas.

Las redes CORS pueden clasificarse, de forma general, en redes públicas y redes privadas. En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**) administra la Red Geodésica Nacional Activa (**RGNA**), una de las principales redes de estaciones GNSS del país. Esta red se complementa con estaciones operadas por

otras instituciones, las cuales aportan información de manera gratuita. Entre ellas se encuentran la estación *IMIP*, perteneciente al Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ciudad Juárez; la estación *IMIE*, perteneciente al Instituto Metropolitano de Investigación y Planeación de Ensenada, Baja California; y la estación *IIEG*, perteneciente al Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco.

Por otro lado, el **INEGI** también administra la Red Geodésica Nacional Pasiva (**RGNP**), la cual está conformada por monumentos geodésicos distribuidos en el territorio nacional. A diferencia de la RGNA, esta red no registra observaciones GNSS continuas, sino que proporciona puntos de referencia geodésicos que pueden ser utilizados en levantamientos y trabajos de posicionamiento.

Además de las redes públicas, existen estaciones CORS administradas por empresas privadas, instituciones académicas y centros de investigación. Estas estaciones pueden utilizarse para aplicaciones de topografía, cartografía, monitoreo, posicionamiento en tiempo real y apoyo a proyectos científicos o de infraestructura.

En 2018, el **INEGI** donó a la Universidad de Colima (**U de C**) un equipo GPS 5700 de doble frecuencia, compatible con la constelación Navstar GPS de Estados Unidos. Esta estación fue utilizada por el **INEGI** de 2003 a 2016 como instrumento topográfico [2].

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (**UNAM**), con apoyo de la empresa Alfa Topografía, instaló en 2024 una estación CORS en el techo del edificio B de la facultad. El equipo instalado corresponde a un receptor **South Net S9**, cuyas principales características son [3]:

- Placa **OEM profesional**, compatible con las constelaciones GPS, Galileo, GLONASS, BDS y SBAS.
- Capacidad para almacenar observaciones hasta una tasa de 50 Hz. Los datos pueden almacenarse en formato RINEX o en el formato crudo propio de la estación.
- Envío de correcciones para posicionamiento RTK en formato RTCM mediante

el protocolo NTRIP.

Este equipo constituye la estación de estudio utilizada en esta tesis. Su operación continua permite obtener observaciones GNSS que pueden ser analizadas para atender problemas relacionados con la calidad de los datos, entre ellos:

- Monitoreo constante de la calidad de las observaciones de la estación.
- Detección de observaciones anómalas.
- Desarrollo de algoritmos eficientes para el monitoreo recurrente de indicadores de calidad.

En México se han desarrollado estudios enfocados en la evaluación de la calidad de los datos registrados por estaciones CORS. Entre ellos destaca el artículo *Quality assessment of Continuous Operating Reference Stations (CORS) - GPS stations in Mexico*, publicado en 2022 en la revista *Geodesy and Geodynamics*. En esta investigación se evaluaron 65 estaciones de referencia mediante el análisis de aproximadamente diez años de observaciones, comprendidos entre enero de 2010 y enero de 2020. La metodología consideró cuatro indicadores de calidad: el efecto de multicamino en las bandas L1 y L2, la relación señal-ruido en ambas bandas, los saltos de ciclo y la integridad de las observaciones. Los resultados se analizaron tomando como referencia criterios internacionales y permitieron proponer valores regionales de calidad para México (RVM). Adicionalmente, se estudiaron las series temporales de estaciones con comportamientos contrastantes y se realizó un análisis de deformación mediante GAMIT/GLOBK, con el propósito de examinar la relación entre la calidad de las observaciones y los resultados del posicionamiento [4].

A nivel internacional, el trabajo *Evaluation of GNSS CORS Data Quality in Uganda* presenta una metodología orientada a evaluar la calidad de los datos de 11 estaciones de referencia, utilizando principalmente las herramientas **G-Nut/Anubis** y **RTKLIB**. El procedimiento comprendió la preparación de archivos RINEX y el análisis de indicadores como la disponibilidad y completitud de los datos, los saltos de

ciclo, el multicamino por frecuencia y constelación, los valores DOP y las series temporales de posición. Posteriormente, los resultados se contrastaron con criterios técnicos de referencia para identificar diferencias en el comportamiento de las estaciones y determinar posibles necesidades de mejora en su operación [5].

Por otra parte, el estudio *La calidad de los datos GNSS en las estaciones de operación continua. Estudio de caso: estación R205 La Paz* evaluó un mes de observaciones de la estación R205, ubicada en Bolivia, mediante el software **TEQC**. Su metodología consistió en calcular seis variables de calidad: multicamino en L1 y L2 (MP1 y MP2), relación señal-ruido en ambas bandas (SNR1 y SNR2), saltos de ciclo por cada mil observaciones y porcentaje de observaciones registradas respecto a las esperadas. Los resultados se compararon con valores de referencia establecidos en diferentes directrices internacionales, realizando evaluaciones tanto para observaciones GPS como para observaciones GPS y GLONASS, con el propósito de determinar el cumplimiento de los criterios de calidad considerados [6].

Estos estudios constituyen antecedentes relevantes para la evaluación de la calidad de las observaciones GNSS mediante indicadores de señal, continuidad y disponibilidad. Sin embargo, presentan diferencias en sus objetivos y procedimientos de análisis. Mientras que estas investigaciones se orientan principalmente a caracterizar el desempeño de estaciones CORS o contrastar sus indicadores con valores de referencia, el presente trabajo propone una metodología que integra **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GipsyX** para analizar diferentes características de las observaciones registradas por la estación CORS FICU. Esta integración permite complementar los indicadores convencionales de calidad con residuos de pseudorango y fase portadora obtenidos mediante procesamiento PPP. Adicionalmente, mediante scripts desarrollados en **Python**, se automatizan tareas de extracción, organización y visualización de resultados, incorporando criterios estadísticos basados en percentiles para identificar valores extremos que requieren una revisión posterior.

Los estudios revisados permiten reconocer diferentes enfoques metodológicos para evaluar la calidad de las observaciones GNSS en estaciones CORS. A partir de estos antecedentes, la presente investigación propone integrar los indicadores obteni-

dos mediante **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GipsyX**, complementando su análisis con herramientas desarrolladas en **Python** y criterios estadísticos basados en percentiles para identificar valores extremos que requieran una revisión posterior.

En este capítulo se presentó el planteamiento del problema, los objetivos específicos, la hipótesis, los alcances y el estado del arte relacionado con el monitoreo de calidad de observaciones GNSS en estaciones CORS. Asimismo, se contextualizó la importancia de la estación CORS FICU como infraestructura geodésica universitaria y se justificó la necesidad de desarrollar una metodología automatizada para evaluar la calidad de sus observaciones. Estos elementos sirven como base para los capítulos posteriores, en los cuales se describen los fundamentos teóricos, las herramientas de procesamiento y la metodología aplicada.

Capítulo 2

Calidad e integridad de los datos GNSS

En el capítulo anterior se presentó el planteamiento del problema, los objetivos específicos, la hipótesis, los alcances y el estado del arte relacionado con el monitoreo de calidad de observaciones GNSS en estaciones CORS. Asimismo, se contextualizó la importancia de la estación CORS FICU como infraestructura geodésica universitaria y se justificó la necesidad de contar con una metodología automatizada para evaluar la calidad de sus observaciones.

En este capítulo se describen los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de la tesis. Primero, se presentan los conceptos generales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), sus segmentos principales y las fuentes de error que afectan las observaciones. Posteriormente, se explican los métodos de posicionamiento SPP, PPP, posicionamiento diferencial y RTK, con énfasis en la resolución de ambigüedades de fase portadora. Finalmente, se describen las correcciones utilizadas en posicionamiento preciso, los fundamentos de integridad, los indicadores de calidad de las observaciones y el criterio estadístico empleado para la detección de anomalías.

2.1. Sistema Global de Navegación por Satélite

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, conocidos como **GNSS** por sus siglas en inglés *Global Navigation Satellite Systems*, han adquirido gran relevancia debido a que permiten determinar posición, velocidad y tiempo en una amplia variedad de aplicaciones. Actualmente, estos sistemas se utilizan en navegación, topografía, geodesia, transporte, agricultura de precisión, monitoreo de infraestructura y sincronización temporal, entre muchas otras áreas.

Aunque muchos de estos sistemas tuvieron inicialmente un origen militar, su uso civil se ha extendido de manera importante y hoy constituyen una infraestructura tecnológica esencial. El predecesor inmediato de los sistemas modernos de posicionamiento fue el *Navy Navigation Satellite System* (**NNSS**), también conocido como sistema *Transit*. Este sistema fue concebido a finales de la década de 1950 y desarrollado durante la década de 1960 por el ejército de los Estados Unidos, principalmente para determinar coordenadas y tiempo en embarcaciones y aplicaciones militares. Posteriormente, su uso civil permitió emplearlo en navegación y trabajos topográficos [7].

Un sistema GNSS puede definirse como un sistema satelital que transmite señales desde el espacio para proporcionar información de posición, navegación y tiempo a receptores ubicados sobre la superficie terrestre o cerca de ella. Entre las constelaciones principales se encuentran **GPS**, desarrollado por Estados Unidos; **GLONASS**, desarrollado por Rusia; **Galileo**, desarrollado por la Unión Europea; y **BeiDou**, desarrollado por China. Un receptor GNSS moderno puede registrar observaciones de una o varias de estas constelaciones, lo que mejora la disponibilidad de satélites y la geometría de posicionamiento.

2.1.1. Segmentos del GNSS

Los sistemas GNSS están constituidos por tres segmentos principales: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuario. Estos segmentos funcionan de manera conjunta para permitir la transmisión, monitoreo y recepción de las señales

utilizadas en el posicionamiento.

Segmento espacial

El segmento espacial está compuesto por los satélites en órbita de cada constelación GNSS. Estos satélites transmiten señales de navegación, información de tiempo y datos orbitales que permiten al receptor calcular su posición. Cada constelación posee características orbitales particulares; sin embargo, todas cumplen la función de proporcionar señales continuas y globales para el posicionamiento.

Constelación	**Características**
GPS	Constelación desarrollada por Estados Unidos. Cuenta con satélites distribuidos en seis planos orbitales, con una altitud aproximada de 20 200 km y un periodo orbital cercano a 12 horas siderales.
GLONASS	Sistema desarrollado por Rusia. Está compuesto por satélites distribuidos en tres planos orbitales, con una altitud aproximada de 19 100 km y un periodo orbital cercano a 11 horas y 15 minutos.
Galileo	Constelación desarrollada por la Unión Europea. Sus satélites se distribuyen en tres planos orbitales, con una altitud aproximada de 23 222 km y un periodo orbital cercano a 14 horas.
BeiDou	Sistema desarrollado por China. Integra satélites GEO, IGSO y MEO. Los satélites MEO orbitan aproximadamente a 21 500 km de altitud, con un periodo cercano a 12 horas y 53 minutos.

Tabla 2.1: Características generales del segmento espacial de las principales constelaciones GNSS.

Segmento de control

El segmento de control comprende la infraestructura terrestre necesaria para operar y mantener cada constelación GNSS. Está conformado por estaciones de monitoreo, antenas de comunicación, centros de control e infraestructura computacional encargada de recibir, procesar y analizar las señales provenientes de los satélites. A partir de esta información se determinan parámetros como las órbitas satelitales,

los errores de reloj y el estado de funcionamiento de cada satélite, lo cual permite actualizar los datos de navegación transmitidos a los usuarios.

Constelación	**Centro de control principal**	**Estaciones de monitoreo**	**Características del segmento de control**
GPS	Schriever Space Force Base, Estados Unidos	Red global de estaciones de monitoreo y antenas terrestres	Calcula órbitas, correcciones de reloj y actualiza los datos de navegación transmitidos por los satélites.
GLONASS	Centro de Control del Sistema GLONASS, Krasnoznamensk, Rusia	Red de estaciones distribuidas principalmente en territorio ruso y estaciones internacionales	Monitorea el estado de los satélites, calcula efemérides y sincroniza los relojes de la constelación.
Galileo	Centros de Control Galileo (GCC) en Alemania e Italia	Red mundial Galileo Sensor Stations (GSS)	Proporciona control orbital, sincronización temporal, generación de mensajes de navegación y servicios de integridad.
BeiDou	Centro de Control de Beijing, China	Red global de estaciones de seguimiento y monitoreo	Administra satélites GEO, IGSO y MEO, calcula órbitas, corrige relojes y mantiene los servicios de navegación.

Tabla 2.2: Comparación general de los segmentos de control de las principales constelaciones GNSS.

Segmento usuario

El segmento usuario está constituido por los receptores GNSS encargados de procesar las señales transmitidas por los satélites para determinar posición, velocidad y tiempo. Estos receptores pueden emplearse en aplicaciones cotidianas de navegación o en aplicaciones especializadas, como posicionamiento geodésico, sincronización temporal, monitoreo de deformaciones y determinación de actitud de plataformas [8].

Este segmento puede confundirse con el segmento de control debido a que ambos utilizan receptores GNSS. Sin embargo, el segmento usuario representa la parte final del sistema, es decir, los equipos y usuarios que emplean la información satelital para

resolver una necesidad de posicionamiento, navegación, sincronización o monitoreo.

2.2. Errores en el GNSS

Las observaciones GNSS están afectadas por distintas fuentes de error que influyen en la precisión y confiabilidad del posicionamiento. De forma general, estos errores pueden clasificarse en tres grupos principales [9]:

- **Errores originados en el satélite.** Incluyen errores orbitales y errores de reloj satelital. En condiciones normales, estos errores son monitoreados y corregidos por el segmento de control; sin embargo, una órbita mal determinada o un error en el reloj del satélite puede introducir sesgos significativos en las observaciones.
- **Errores asociados a la propagación de la señal.** Corresponden principalmente a los efectos ionosférico y troposférico. La ionosfera es un medio dispersivo que afecta de manera distinta a las señales dependiendo de su frecuencia, mientras que la troposfera introduce un retraso prácticamente independiente de la frecuencia, asociado con presión, temperatura y vapor de agua.
- **Errores originados en el receptor y su entorno.** Incluyen ruido de medición, errores de seguimiento, interferencias locales, obstrucciones, sesgos instrumentales y efecto de multicamino. Estos errores son especialmente relevantes en estaciones instaladas cerca de edificios, estructuras metálicas, árboles u otras superficies reflectantes.

La identificación y mitigación de estas fuentes de error es fundamental para el monitoreo de calidad de una estación CORS, ya que permiten interpretar adecuadamente los indicadores calculados en los capítulos posteriores.

2.3. Métodos de posicionamiento en el GNSS

Existen diferentes estrategias de posicionamiento GNSS. Estas pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de observación empleada, la forma en que se tratan los errores

y la dependencia o no de estaciones de referencia. En esta sección se describen el posicionamiento puntual simple, el posicionamiento puntual preciso, el posicionamiento diferencial y el posicionamiento cinemático en tiempo real.

2.3.1. Posicionamiento puntual simple

El Posicionamiento Puntual Simple, conocido como **SPP** por sus siglas en inglés *Single Point Positioning*, permite determinar la posición de un receptor GNSS de manera independiente, sin utilizar observaciones simultáneas de una estación de referencia. En su formulación más común, se basa en observaciones de pseudorango provenientes de los satélites disponibles. La posición se obtiene a partir de la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, junto con los términos de error asociados con los relojes, la propagación atmosférica y otros efectos presentes en la observación.

El SPP presenta una precisión menor que otras estrategias de posicionamiento debido a que no cancela errores comunes mediante diferenciación. Por ello, los errores orbitales, de reloj, ionosféricos, troposféricos y de multicamino deben modelarse o corregirse de manera individual. A pesar de esta limitación, el SPP constituye la base conceptual de los métodos de posicionamiento GNSS y permite obtener soluciones de navegación con un receptor aislado [10].

La observación de pseudorango puede modelarse como [10]:

$$R_i^k(t_r, t_e) = \rho_i^k(t_r, t_e) - c\left(\delta t_i - \delta t^k\right) + \delta_{\text{ion},i}^k + \delta_{\text{trop},i}^k + \delta_{\text{tide},i}^k + \delta_{\text{rel},i}^k + \varepsilon_{R,i}^k, \qquad (2.1)$$

donde R_i^k representa el pseudorango observado entre el receptor i y el satélite k; ρ_i^k es la distancia geométrica entre ambos; δt_i y δt^k son los errores de reloj del receptor y del satélite, respectivamente; c es la velocidad de la luz; $\delta_{\text{ion},i}^k$ representa el retardo ionosférico; $\delta_{\text{trop},i}^k$ el retardo troposférico; $\delta_{\text{tide},i}^k$ las correcciones asociadas a mareas; $\delta_{\text{rel},i}^k$ los efectos relativistas, y $\varepsilon_{R,i}^k$ agrupa el ruido de medición y otros errores residuales.

Debido a que las coordenadas del receptor son inicialmente desconocidas, el modelo

debe linealizarse alrededor de una posición aproximada. Las incógnitas principales pueden agruparse en el vector:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & \Delta z & \Delta t \end{bmatrix}^T, \tag{2.2}$$

donde Δx, Δy y Δz son las correcciones a las coordenadas iniciales del receptor, mientras que Δt representa el sesgo del reloj del receptor expresado en unidades de longitud.

Al reunir las ecuaciones correspondientes a todos los satélites observados, el sistema linealizado puede escribirse como:

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \tag{2.3}$$

donde $\mathbf{l}$ es el vector de observaciones menos calculadas, $\mathbf{A}$ es la matriz de diseño, $\mathbf{x}$ es el vector de incógnitas y $\mathbf{v}$ es el vector de residuos. Si se considera una matriz de pesos $\mathbf{P}$, la solución por mínimos cuadrados ponderados se obtiene mediante:

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\right)^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l}. \tag{2.4}$$

Dado que deben estimarse tres componentes de posición y un sesgo de reloj, se requieren observaciones de al menos cuatro satélites. Cuando existe un mayor número de satélites, el sistema queda sobredeterminado y puede resolverse mediante mínimos cuadrados. La solución suele obtenerse de forma iterativa, actualizando la posición aproximada hasta que las correcciones estimadas sean suficientemente pequeñas [10].

2.3.2. Posicionamiento puntual preciso

El Posicionamiento Puntual Preciso, conocido como **PPP** por sus siglas en inglés *Precise Point Positioning*, es una técnica de posicionamiento absoluto que utiliza observaciones de pseudorango y fase portadora. A diferencia del SPP, el PPP emplea productos precisos de órbita y reloj satelital, además de modelos geodésicos y atmosféricos para reducir los errores sistemáticos presentes en las observaciones. Ge-

neralmente se implementa con receptores de doble frecuencia, lo que permite formar combinaciones que reducen el efecto ionosférico de primer orden y estimar parámetros como el retraso troposférico residual [9].

El desempeño del PPP puede evaluarse mediante distintos criterios, entre ellos exactitud, precisión, tiempo de convergencia, disponibilidad e integridad. Una vez alcanzada la convergencia, el PPP puede proporcionar precisiones centimétricas en condiciones estáticas favorables. En aplicaciones cinemáticas, el desempeño depende de la calidad de las observaciones, la geometría satelital, el entorno de recepción y la disponibilidad de productos precisos [9].

Además del modelo de pseudorango de la ecuación (2.1), el PPP utiliza observaciones de fase portadora. Expresada en unidades de longitud, la observación de fase puede escribirse como:

$$\Phi_i^k(t) = \rho_i^k - c\left(\delta t_i - \delta t^k\right) - I_i^k + T_i^k + \delta m_i^k + \lambda N_i^k + \varepsilon_{\Phi,i}^k, \tag{2.5}$$

donde Φ_i^k representa la observación de fase portadora entre el receptor i y el satélite k; I_i^k es el efecto ionosférico sobre la fase, el cual aparece con signo negativo debido al avance de fase; T_i^k es el retardo troposférico; δm_i^k representa errores como multicamino u otros efectos no modelados; λ es la longitud de onda de la señal; N_i^k es la ambigüedad de fase portadora, y $\varepsilon_{\Phi,i}^k$ agrupa el ruido y errores residuales.

La ambigüedad N_i^k aparece porque, al iniciar el seguimiento de una señal, el receptor mide la parte fraccionaria de la fase, pero desconoce el número entero de ciclos completos existentes entre el satélite y el receptor. En el PPP convencional, al trabajar con observaciones no diferenciadas, las ambigüedades quedan afectadas por sesgos del receptor y del satélite, por lo que normalmente se estiman como parámetros reales o flotantes. La recuperación de su naturaleza entera requiere el tratamiento explícito de sesgos instrumentales, como ocurre en técnicas PPP con resolución de ambigüedades o PPP-RTK [9, 10].

2.3.3. Posicionamiento diferencial

El posicionamiento diferencial GNSS utiliza observaciones simultáneas realizadas por dos receptores: una estación base de coordenadas conocidas y un receptor móvil o *rover*. La idea fundamental consiste en combinar observaciones de ambos receptores hacia los mismos satélites para eliminar o reducir errores comunes, como errores de reloj, errores orbitales y, en cierta medida, efectos atmosféricos.

Sea r el receptor móvil, b la estación base, k un satélite observado y l un satélite de referencia. La simple diferencia entre receptores para el pseudorango se define como:

$$\nabla R_{rb}^{k} = R_{r}^{k} - R_{b}^{k}. \tag{2.6}$$

Al sustituir el modelo de pseudorango de la ecuación (2.1), el término de reloj del satélite δt^k aparece en ambas observaciones y se cancela. Por lo tanto, la simple diferencia de pseudorango queda expresada como:

$$\nabla R_{rb}^{k} = \nabla \rho_{rb}^{k} - c\,(\delta t_r - \delta t_b) + \nabla \delta_{\text{ion},rb}^{k} + \nabla \delta_{\text{trop},rb}^{k} + \nabla \delta_{\text{tide},rb}^{k} + \nabla \delta_{\text{rel},rb}^{k} + \nabla \varepsilon_{R,rb}^{k}, \tag{2.7}$$

donde el operador de simple diferencia se define como:

$$\nabla (\cdot)_{rb}^{k} = (\cdot)_{r}^{k} - (\cdot)_{b}^{k}. \tag{2.8}$$

La simple diferencia elimina el error de reloj del satélite, pero conserva el error relativo entre los relojes de los receptores. Para eliminar este término se forma una segunda diferencia entre dos satélites observados simultáneamente. La doble diferencia de pseudorango se define como:

$$\Delta \nabla R_{rb}^{kl} = \nabla R_{rb}^{k} - \nabla R_{rb}^{l}. \tag{2.9}$$

Al desarrollar esta expresión, el término $c(\delta t_r - \delta t_b)$ se cancela, por lo que el modelo de doble diferencia de pseudorango queda como:

$$\Delta\nabla R_{rb}^{kl} = \Delta\nabla\rho_{rb}^{kl} + \Delta\nabla\delta_{\text{ion},rb}^{kl} + \Delta\nabla\delta_{\text{trop},rb}^{kl} + \Delta\nabla\delta_{\text{tide},rb}^{kl} + \Delta\nabla\delta_{\text{rel},rb}^{kl} + \Delta\nabla\varepsilon_{R,rb}^{kl}. \quad (2.10)$$

El operador de doble diferencia se define como:

$$\Delta\nabla(\cdot)_{rb}^{kl} = \left[(\cdot)_r^k - (\cdot)_b^k\right] - \left[(\cdot)_r^l - (\cdot)_b^l\right]. \quad (2.11)$$

Para la observación de fase portadora se sigue el mismo procedimiento. La doble diferencia de fase queda dada por:

$$\Delta\nabla\Phi_{rb}^{kl} = \Delta\nabla\rho_{rb}^{kl} - \Delta\nabla I_{rb}^{kl} + \Delta\nabla T_{rb}^{kl} + \Delta\nabla\delta m_{rb}^{kl} + \lambda\Delta\nabla N_{rb}^{kl} + \Delta\nabla\varepsilon_{\Phi,rb}^{kl}. \quad (2.12)$$

El término $\Delta\nabla N_{rb}^{kl}$ corresponde a la ambigüedad entera de doble diferencia:

$$\Delta\nabla N_{rb}^{kl} = \left(N_r^k - N_b^k\right) - \left(N_r^l - N_b^l\right). \quad (2.13)$$

Esta ambigüedad es fundamental en el posicionamiento relativo de alta precisión, ya que la correcta estimación y fijación de su valor entero permite aprovechar la alta precisión de la fase portadora.

En términos geométricos, la distancia entre el satélite k y el receptor i puede expresarse como:

$$\rho_i^k = \left\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_i\right\|, \quad (2.14)$$

donde $\mathbf{x}^k$ es el vector de coordenadas del satélite y $\mathbf{x}_i$ es el vector de coordenadas del receptor. Si la posición de la estación base es conocida, el objetivo del posicionamiento diferencial consiste en estimar el vector de línea base:

$$\mathbf{b}_{rb} = \mathbf{x}_r - \mathbf{x}_b, \quad (2.15)$$

donde $\mathbf{x}_r$ representa las coordenadas del receptor móvil y $\mathbf{x}_b$ las coordenadas de

la estación base. Para líneas base cortas o moderadas, la doble diferencia geométrica puede linealizarse como:

$$\Delta\nabla\rho_{rb}^{kl} \approx -\left(\mathbf{e}_b^k - \mathbf{e}_b^l\right)^T \mathbf{b}_{rb}, \tag{2.16}$$

donde $\mathbf{e}_b^k$ y $\mathbf{e}_b^l$ son los vectores unitarios de línea de vista desde la estación base hacia los satélites k y l, respectivamente.

En líneas base cortas, los efectos ionosféricos y troposféricos entre la estación base y el receptor móvil son altamente correlacionados, por lo que los términos diferenciales atmosféricos se reducen considerablemente. Bajo esta condición, los modelos simplificados pueden escribirse como:

$$\Delta\nabla R_{rb}^{kl} \approx -\left(\mathbf{e}_b^k - \mathbf{e}_b^l\right)^T \mathbf{b}_{rb} + \Delta\nabla\varepsilon_{R,rb}^{kl}, \tag{2.17}$$

para el pseudorango, y:

$$\Delta\nabla\Phi_{rb}^{kl} \approx -\left(\mathbf{e}_b^k - \mathbf{e}_b^l\right)^T \mathbf{b}_{rb} + \lambda\Delta\nabla N_{rb}^{kl} + \Delta\nabla\varepsilon_{\Phi,rb}^{kl}, \tag{2.18}$$

para la fase portadora. Estas expresiones muestran la ventaja principal del posicionamiento diferencial: las dobles diferencias eliminan los errores de reloj de los satélites y de los receptores, mientras que reducen efectos comunes como ionosfera, troposfera y errores orbitales, dependiendo de la longitud de la línea base.

2.3.4. Posicionamiento cinemático en tiempo real

El posicionamiento cinemático en tiempo real, conocido como **RTK** por sus siglas en inglés *Real-Time Kinematic*, es una técnica de posicionamiento diferencial basada principalmente en observaciones de fase portadora. En RTK, una estación de referencia transmite observaciones o correcciones a un receptor móvil, lo que permite resolver la línea base en tiempo real y obtener posiciones con precisión centimétrica bajo condiciones favorables [9].

La transmisión de datos puede realizarse mediante radios VHF o UHF, aunque

estos enlaces suelen requerir línea de vista entre transmisor y receptor. Otra alternativa es el uso de Internet mediante el protocolo *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (**NTRIP**), el cual permite recibir correcciones GNSS a través de redes cableadas o inalámbricas [9]. Esta segunda opción es ampliamente utilizada en redes CORS debido a su flexibilidad y cobertura.

2.4. Resolución de ambigüedades de fase portadora

Los métodos GNSS de alta precisión se basan principalmente en observaciones de fase portadora. Sin embargo, estas observaciones contienen un número entero desconocido de ciclos completos entre el satélite y el receptor al inicio del seguimiento de la señal. A este término se le conoce como ambigüedad de fase portadora. Resolver correctamente esta ambigüedad es fundamental para obtener soluciones centimétricas o milimétricas.

De acuerdo con [7], el problema de resolución de ambigüedades puede dividirse en dos etapas principales: la estimación de las ambigüedades y la validación de la solución entera. En posicionamiento relativo, resulta conveniente trabajar con observaciones de fase en doble diferencia, ya que esta combinación elimina los errores de reloj del satélite y del receptor, y reduce efectos atmosféricos comunes para líneas base cortas.

Partiendo de la ecuación de doble diferencia de fase, y suponiendo que los errores atmosféricos residuales son pequeños o han sido adecuadamente modelados, el modelo puede simplificarse como:

$$\Delta\nabla\Phi_{rb}^{kl} \approx \Delta\nabla\rho_{rb}^{kl} + \lambda\Delta\nabla N_{rb}^{kl} + \Delta\nabla\varepsilon_{\Phi,rb}^{kl}. \tag{2.19}$$

En esta expresión, $\Delta\nabla\rho_{rb}^{kl}$ depende de la geometría entre los receptores y los satélites, mientras que $\Delta\nabla N_{rb}^{kl}$ es la ambigüedad entera que debe estimarse. Una vez que las ambigüedades se fijan correctamente a valores enteros, la fase portadora puede utilizarse como una observación de distancia de muy alta precisión.

Si se observan m satélites durante T épocas y se selecciona un satélite de referencia, en cada época se forman $m-1$ dobles diferencias independientes. Por lo

tanto, el número total de observaciones en doble diferencia es $(m-1)T$. Las incógnitas principales corresponden a las tres componentes de la línea base y a las $m-1$ ambigüedades en doble diferencia, siempre que no existan saltos de ciclo durante el intervalo analizado [7].

Después de linealizar el modelo de observación, el sistema puede expresarse como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{a} + \mathbf{B}\mathbf{b} + \mathbf{e}, \tag{2.20}$$

donde $\mathbf{y}$ es el vector de observaciones de fase portadora en doble diferencia, observadas menos calculadas; $\mathbf{a}$ es el vector de ambigüedades enteras en doble diferencia; $\mathbf{b}$ es el vector de componentes reales de la línea base; $\mathbf{A}$ y $\mathbf{B}$ son las matrices de diseño asociadas a las ambigüedades y a la línea base, respectivamente, y $\mathbf{e}$ es el vector de errores de observación.

El sistema contiene dos tipos de parámetros desconocidos: la línea base, cuyos componentes son valores reales, y las ambigüedades, que deben pertenecer al conjunto de los números enteros. Debido a esta restricción, el problema no se resuelve únicamente mediante mínimos cuadrados convencionales, sino como un problema de mínimos cuadrados enteros:

$$\min_{\mathbf{a}\in\mathbb{Z}^{m-1},\,\mathbf{b}\in\mathbb{R}^3} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{a} - \mathbf{B}\mathbf{b}\|^2_{\mathbf{Q}_y}\,, \tag{2.21}$$

donde $\mathbf{Q}_y$ es la matriz de varianza-covarianza de las observaciones. En una primera etapa se obtiene una solución real o flotante, en la cual las ambigüedades se estiman sin imponer la restricción entera. Posteriormente, se busca el conjunto de enteros que mejor se ajusta a las observaciones y, si la solución es validada, las ambigüedades se fijan para recalcular la línea base con mayor precisión [7].

Uno de los métodos más utilizados para este propósito es el algoritmo **LAMBDA**, por sus siglas en inglés *Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment*. Este método parte de la solución flotante y aplica una transformación de decorrelación que reduce la dependencia estadística entre las ambigüedades, disminuyendo el espacio de búsqueda de candidatos enteros. Una vez encontrada la combinación óptima, la

solución entera debe validarse antes de ser aceptada como solución fija [7].

2.5. Correcciones para RTK y Posicionamiento Puntual Preciso

Con el objetivo de obtener soluciones de alta precisión, los métodos RTK y PPP incorporan modelos y correcciones para compensar los principales errores que afectan las observaciones GNSS. Entre los más importantes se encuentran las correcciones orbitales, de reloj, atmosféricas y los sesgos de código y fase.

2.5.1. Correcciones orbitales

La determinación precisa de la posición de un receptor GNSS depende, entre otros factores, del conocimiento de la posición de los satélites en cada época de observación. Cualquier error orbital se refleja directamente en la estimación de la posición del usuario y constituye una fuente de error tanto en posicionamiento absoluto como en posicionamiento relativo [11].

Desde el punto de vista teórico, el movimiento de un satélite puede describirse mediante un modelo kepleriano ideal, definido por seis parámetros orbitales. Sin embargo, la órbita real de un satélite GNSS difiere de este modelo debido a perturbaciones como irregularidades del campo gravitacional terrestre, atracción gravitacional del Sol y la Luna, presión de radiación solar y otros efectos dinámicos. La incorporación de estas perturbaciones permite generar efemérides más precisas y reducir el error asociado con la posición del satélite [11].

Dependiendo del nivel de precisión requerido, la información orbital utilizada en GNSS puede clasificarse en tres grupos:

- Datos de almanaque.
- Efemérides transmitidas.
- Efemérides precisas.

Los datos de almanaque contienen información orbital aproximada y se utilizan principalmente para facilitar la adquisición inicial de satélites y la planeación de observaciones. Las efemérides transmitidas forman parte del mensaje de navegación y permiten calcular la posición de los satélites en aplicaciones de navegación y RTK. En constelaciones como GPS, Galileo y BeiDou, la órbita se representa mediante parámetros keplerianos corregidos, mientras que GLONASS transmite información orbital mediante vectores de posición y velocidad [11].

En PPP se emplean efemérides precisas proporcionadas por centros especializados, como el *International GNSS Service* (IGS). Estos productos contienen coordenadas satelitales de alta precisión y, dependiendo del producto, correcciones de reloj. Generalmente se distribuyen en formato **SP3**, con posiciones satelitales en épocas discretas; por ello, la posición del satélite en el instante exacto de observación se obtiene mediante interpolación. El uso de efemérides precisas permite reducir el error orbital de metros a centímetros, lo que constituye una condición esencial para alcanzar precisión centimétrica en PPP [11].

2.5.2. Correcciones de reloj

La sincronización temporal es fundamental en GNSS, ya que las observaciones se basan en la medición del tiempo de propagación de la señal. Los satélites incorporan relojes atómicos de alta estabilidad, como estándares de rubidio, cesio y, en algunos sistemas, máseres de hidrógeno. A pesar de su estabilidad, los relojes satelitales no permanecen perfectamente sincronizados con la escala de tiempo del sistema, por lo que sus sesgos deben modelarse y corregirse [11].

En las observaciones GNSS intervienen el reloj del receptor y el reloj del satélite. El efecto combinado puede expresarse como:

$$\Delta\delta t_i^k = \delta t_i - \delta t^k, \tag{2.22}$$

el cual aparece multiplicado por la velocidad de la luz en los modelos de pseudorango y fase. Debido a este factor de escala, errores temporales muy pequeños pueden

producir errores significativos en distancia.

En RTK, los errores de reloj se reducen mediante diferenciación. La simple diferencia entre receptores cancela el error del reloj del satélite, mientras que la doble diferencia cancela además el error relativo entre relojes de los receptores. Esta cancelación matemática es una de las principales ventajas del posicionamiento diferencial, ya que permite alcanzar alta precisión sin depender necesariamente de productos precisos de reloj satelital [11].

En PPP, en cambio, no se forman diferencias entre receptores. Por ello, el sesgo del reloj satelital se corrige mediante productos precisos proporcionados por centros como IGS o JPL, mientras que el sesgo del reloj del receptor permanece como una incógnita que debe estimarse junto con otros parámetros del modelo, como la posición, el retraso troposférico y las ambigüedades de fase [12].

2.5.3. Correcciones atmosféricas

Las señales GNSS deben atravesar la atmósfera antes de ser recibidas por el receptor. Durante este recorrido, la propagación se ve afectada principalmente por la ionosfera y la troposfera. La ionosfera es un medio dispersivo, por lo que el efecto depende de la frecuencia de la señal; en cambio, la troposfera se comporta como un medio prácticamente no dispersivo para las frecuencias GNSS. Ambas capas introducen retrasos que deben modelarse o reducirse para mejorar la precisión del posicionamiento [9].

Correcciones ionosféricas

La ionosfera contiene partículas eléctricamente cargadas generadas principalmente por la radiación solar. El efecto ionosférico depende del Contenido Total de Electrones, conocido como **TEC** por sus siglas en inglés *Total Electron Content*, que representa el número total de electrones libres contenidos en una columna de sección transversal de 1 m^2 a lo largo de la trayectoria de la señal [9].

La densidad electrónica no es uniforme y presenta variaciones espaciales, diarias,

estacionales y asociadas con la actividad solar. La mayor concentración de electrones suele encontrarse en la región F2 de la ionosfera, aproximadamente entre 250 y 400 km de altitud. Debido a que la ionosfera es dispersiva, el pseudorango experimenta un retraso, mientras que la fase portadora presenta un efecto de signo contrario. Además, la magnitud del retraso disminuye conforme aumenta la frecuencia de la señal.

En RTK, el efecto ionosférico se reduce por la correlación espacial entre la estación base y el receptor móvil, especialmente en líneas base cortas. Sin embargo, conforme aumenta la longitud de la línea base, la correlación disminuye y el error ionosférico diferencial adquiere mayor importancia. En PPP, al utilizar un único receptor, no se puede aplicar esta cancelación espacial; por ello, se emplean observaciones multifrecuencia, modelos ionosféricos o productos externos para reducir el efecto ionosférico [9].

Combinación libre de ionosfera

Una de las principales estrategias para reducir el efecto ionosférico en receptores GNSS de doble frecuencia es la denominada combinación libre de ionosfera (*Ionosphere-Free*, IF). Esta combinación aprovecha el carácter dispersivo de la ionosfera, ya que el efecto producido sobre las observaciones depende de la frecuencia de la señal. En una aproximación de primer orden, dicho efecto es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia [10]:

$$\delta_p(f) = \frac{A_1}{f^2}, \qquad A_1 = \int a_1 \, ds, \tag{2.23}$$

donde $\delta_p(f)$ representa el efecto ionosférico sobre la observación de fase portadora a la frecuencia f, mientras que A_1 corresponde a la contribución ionosférica integrada a lo largo de la trayectoria recorrida por la señal.

Para dos frecuencias diferentes, f_1 y f_2, el efecto ionosférico de primer orden sobre la fase puede expresarse como:

$$\delta_p(f_1) = \frac{A_1}{f_1^2}, \qquad \delta_p(f_2) = \frac{A_1}{f_2^2}. \tag{2.24}$$

A partir de estas expresiones se observa que, al ponderar ambos términos por el cuadrado de sus respectivas frecuencias, se obtiene [10]:

$$f_1^2 \delta_p(f_1) - f_2^2 \delta_p(f_2) = 0. \tag{2.25}$$

Esta relación constituye el principio de la combinación libre de ionosfera, ya que permite formar una combinación lineal de observaciones en dos frecuencias en la que se elimina el efecto ionosférico de primer orden.

Para las observaciones de pseudorango, la combinación libre de ionosfera puede expresarse como:

$$R_{IF}^k = \frac{f_1^2 R_1^k - f_2^2 R_2^k}{f_1^2 - f_2^2}, \tag{2.26}$$

mientras que, para las observaciones de fase portadora, se expresa como:

$$\Phi_{IF}^k = \frac{f_1^2 \Phi_1^k - f_2^2 \Phi_2^k}{f_1^2 - f_2^2}. \tag{2.27}$$

En estas expresiones, R_1^k y R_2^k representan las observaciones de pseudorango del satélite k realizadas en las frecuencias f_1 y f_2, respectivamente; Φ_1^k y Φ_2^k corresponden a las observaciones de fase portadora en dichas frecuencias; y R_{IF}^k y Φ_{IF}^k representan las observaciones resultantes de la combinación libre de ionosfera [10].

La combinación IF elimina el efecto ionosférico de primer orden; sin embargo, permanecen contribuciones de orden superior, principalmente de segundo y tercer orden, cuya magnitud es considerablemente menor. En aplicaciones geodésicas de muy alta precisión, estos efectos residuales pueden ser modelados y corregidos [9, 10].

El efecto ionosférico también presenta un comportamiento opuesto entre las observaciones de código y fase portadora. En una aproximación de primer orden, ambos efectos presentan aproximadamente la misma magnitud, pero con signo contrario [10]:

$$\delta_p(f) = -\delta_g(f) = \frac{A_1}{f^2}, \tag{2.28}$$

donde $\delta_p(f)$ representa el efecto ionosférico sobre la fase portadora y $\delta_g(f)$ el

retraso ionosférico de grupo asociado al pseudorango. Por esta razón, una combinación entre observaciones de fase y código realizadas en una misma frecuencia también permite cancelar el efecto ionosférico de primer orden:

$$\delta_p(f) + \delta_g(f) = 0. \tag{2.29}$$

No obstante, esta combinación presenta una precisión menor que la observación de fase portadora utilizada individualmente, debido principalmente a la mayor incertidumbre asociada a las observaciones de código [10].

Modelo ionosférico transmitido

Cuando únicamente se dispone de observaciones de una frecuencia, no es posible formar una combinación libre de ionosfera a partir de las observaciones del propio receptor. Una alternativa consiste en utilizar modelos ionosféricos cuyos parámetros se transmiten mediante el mensaje de navegación. En el caso de GPS, se emplea el modelo ionosférico de Klobuchar, diseñado para estimar y reducir parte del retraso ionosférico presente en las observaciones [13, 14].

El modelo utiliza ocho coeficientes transmitidos por los satélites: cuatro coeficientes α_i y cuatro coeficientes β_i. Además, requiere la posición geodésica del receptor, el tiempo de observación y la geometría entre el receptor y el satélite. Los ángulos empleados en el modelo se expresan en semiciclos, donde un semiciclo equivale a 180°.

Uno de los parámetros utilizados es el factor de oblicuidad F, también denominado función de mapeo, que permite relacionar el retraso ionosférico en dirección cenital con el correspondiente a la trayectoria inclinada de la señal. Este factor se expresa como [13, 14]:

$$F = 1 + 16(0.53 - E)^3, \tag{2.30}$$

donde E representa el ángulo de elevación del satélite expresado en semiciclos. El valor de F aumenta conforme disminuye la elevación, debido a que la señal recorre una trayectoria mayor a través de la ionosfera.

La variación temporal del retraso ionosférico se representa mediante la fase x, calculada como:

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{P}, \tag{2.31}$$

donde t corresponde al tiempo local, en segundos, del punto subionosférico y P representa el periodo del modelo ionosférico, también expresado en segundos. El valor 50400 corresponde al instante de referencia empleado por el modelo para representar aproximadamente el máximo diario del efecto ionosférico.

La amplitud Q y el periodo P se obtienen a partir de los coeficientes α_i y β_i transmitidos en el mensaje de navegación y de la latitud geomagnética del punto subionosférico. El modelo establece un periodo mínimo de 72000 segundos y una amplitud no negativa [13, 14].

A partir de estos parámetros, el retraso ionosférico de grupo para la frecuencia L1 se calcula mediante dos expresiones. Cuando el valor absoluto de la fase ionosférica es mayor que 1.57, se adopta un valor nocturno constante:

$$\delta_g(f_1) = cF\left(5 \times 10^{-9}\right), \qquad |x| > 1.57, \tag{2.32}$$

mientras que, para $|x| \leq 1.57$, el retraso se obtiene mediante:

$$\delta_g(f_1) = cF\left[5 \times 10^{-9} + Q\left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24}\right)\right], \qquad |x| \leq 1.57. \tag{2.33}$$

En estas expresiones, $\delta_g(f_1)$ representa el retraso ionosférico de grupo correspondiente a la frecuencia f_1; c es la velocidad de la luz en el vacío; F es el factor de oblicuidad; Q representa la amplitud del modelo; y x describe la variación temporal del retraso respecto al tiempo local del punto subionosférico.

Una vez determinado el retraso correspondiente a L1, el efecto sobre una segunda frecuencia puede calcularse mediante la dependencia inversa con el cuadrado de la frecuencia. Para L2 se obtiene [13, 14]:

$$\delta_g(f_2) = \frac{f_1^2}{f_2^2}\delta_g(f_1), \tag{2.34}$$

donde f_1 y f_2 representan las frecuencias portadoras L1 y L2, respectivamente. Esta relación refleja nuevamente el carácter dispersivo de la ionosfera, debido a que una misma trayectoria produce efectos de distinta magnitud dependiendo de la frecuencia de la señal.

Para aplicar el modelo también es necesario determinar el punto subionosférico asociado con la trayectoria de propagación. Su posición depende de la latitud φ y longitud λ geodésicas del receptor, así como del azimut A y la elevación E del satélite. A partir de este punto se determina la latitud geomagnética utilizada para calcular la amplitud y el periodo de la variación ionosférica [13, 14].

El modelo ionosférico transmitido constituye una aproximación del comportamiento real de la ionosfera y, por lo tanto, no elimina completamente su efecto. De acuerdo con los resultados citados por el autor, el modelo puede reducir más del 50 % del retraso ionosférico [15, 16].

Correcciones troposféricas

La troposfera es la capa baja de la atmósfera terrestre y afecta la propagación de las señales GNSS mediante un retraso prácticamente independiente de la frecuencia. Su efecto depende principalmente de la presión atmosférica, la temperatura y el contenido de vapor de agua. El retraso troposférico suele dividirse en una componente seca o hidrostática y una componente húmeda. La componente seca representa la mayor parte del retraso y puede modelarse con buena precisión, mientras que la componente húmeda es más variable y difícil de estimar [11].

En RTK, para líneas base cortas, las condiciones troposféricas experimentadas por la estación base y el receptor móvil suelen ser similares, por lo que el retraso troposférico diferencial se reduce mediante dobles diferencias. Conforme aumenta la separación entre receptores, las diferencias atmosféricas se vuelven más importantes. En PPP, el retraso troposférico no puede reducirse por diferenciación entre receptores,

por lo que se modela una componente a priori y se estima un retraso cenital residual durante el ajuste [9].

Modelos de Hopfield y Saastamoine

El modelo de Hopfield representa el retraso troposférico separando la refractividad atmosférica en una componente seca y una componente húmeda [17–19]. El retraso troposférico total puede expresarse como:

$$\delta = \delta_d + \delta_w, \tag{2.35}$$

donde δ_d y δ_w representan las contribuciones seca y húmeda, respectivamente. Para cada componente, el modelo de Hopfield modificado puede expresarse de forma general como:

$$\delta_i = 10^{-6} N_i \sum_{q=1}^{9} \frac{f_{q,i}}{q} r_i^q, \qquad i = d, w. \tag{2.36}$$

En esta expresión, N_i representa la refractividad atmosférica de la componente seca o húmeda, r_i está relacionado con la trayectoria efectiva de propagación de la señal y $f_{q,i}$ son coeficientes asociados con la geometría de propagación y el perfil vertical de refractividad.

El modelo de Saastamoinen estima el retraso troposférico a partir de parámetros meteorológicos medidos en la estación y de la geometría de observación [20, 21]. En su forma modificada, el retraso puede expresarse como:

$$\delta = \frac{0.002277}{\cos z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R, \tag{2.37}$$

donde δ es el retraso troposférico total, z es el ángulo cenital del satélite, P es la presión atmosférica, T es la temperatura absoluta, e es la presión parcial del vapor de agua, B es un término de corrección asociado con la altura de la estación y δR representa una corrección adicional. El resultado se expresa en metros.

Para representar el retraso troposférico oblicuo también se emplean funciones de

mapeo, las cuales transforman el retraso cenital en el retraso correspondiente al ángulo de elevación de la señal. En procesamiento preciso pueden utilizarse funciones como GMF, GPT, GPT2 o VMF1, así como gradientes troposféricos para modelar asimetrías atmosféricas [9].

2.5.4. Sesgos de código y fase

Las observaciones de código y fase están afectadas por sesgos instrumentales introducidos por el satélite y por el receptor. Estos sesgos dependen de la frecuencia y del tipo de observación, por lo que deben considerarse en aplicaciones de posicionamiento preciso [10].

En RTK, las diferencias simples y dobles diferencias reducen o eliminan varios sesgos comunes entre receptores y satélites. En líneas base cortas, esta propiedad contribuye a mejorar la precisión y a simplificar el modelo de observación. En PPP, al trabajar con observaciones no diferenciadas, los sesgos deben corregirse o estimarse explícitamente. Los sesgos diferenciales de código, conocidos como **DCB** por sus siglas en inglés *Differential Code Biases*, compensan diferencias de retardo entre señales de código. Por otro lado, los sesgos de fase, conocidos como **FCB** por sus siglas en inglés *Fractional Cycle Biases*, afectan la propiedad entera de las ambigüedades y deben tratarse adecuadamente para permitir la resolución de ambigüedades en PPP [9, 10].

2.6. Fundamentos de integridad de las observaciones GNSS

La precisión no es el único requisito en aplicaciones GNSS. En aplicaciones críticas, como la navegación aérea, también es necesario garantizar que la solución de posicionamiento sea confiable. En este contexto, la integridad se define como la capacidad del sistema para proporcionar confianza en la solución y advertir oportunamente al usuario cuando dicha solución no debe utilizarse [9].

Los algoritmos de monitoreo de integridad verifican continuamente la consistencia

de las observaciones con el objetivo de detectar mediciones poco confiables. Cuando se identifica una falla, el sistema puede advertir al usuario o excluir la observación afectada para mantener una solución confiable. En este contexto se emplean conceptos como el **Nivel de Protección** (*Protection Level*, **PL**), que representa un límite estadístico del error de posicionamiento bajo condiciones específicas de operación [22].

En entornos terrestres, el monitoreo de integridad ha adquirido importancia debido a que fenómenos como señales sin línea de vista (*Non-Line-of-Sight*, **NLOS**), multicamino, interferencia y obstrucciones pueden degradar considerablemente la solución. Estos efectos son especialmente relevantes en ambientes urbanos, donde edificios y estructuras cercanas modifican la propagación de la señal [22].

Los algoritmos de integridad pueden clasificarse en métodos instantáneos o *snapshot*, y métodos secuenciales. Los métodos instantáneos evalúan la consistencia de las observaciones en una sola época, usualmente mediante mínimos cuadrados. Los métodos secuenciales incorporan información temporal, por ejemplo mediante filtros de Kalman, para detectar inconsistencias considerando la evolución del sistema [22].

En navegación aérea, la Organización de Aviación Civil Internacional (**ICAO**) estableció estándares para el uso de GNSS e impulsó sistemas de aumentación orientados a garantizar integridad e interoperabilidad. Estos sistemas incluyen [9]:

- **ABAS** (*Aircraft-Based Augmentation System*): sistema de aumentación basado en la aeronave.
- **SBAS** (*Satellite-Based Augmentation System*): sistema de aumentación basado en satélites.
- **GBAS** (*Ground-Based Augmentation System*): sistema de aumentación basado en estaciones terrestres.

Dentro de ABAS se encuentran técnicas como **AAIM** (*Aircraft Autonomous Integrity Monitoring*) y **RAIM** (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*). RAIM aprovecha la redundancia de observaciones satelitales para verificar la consistencia de

las mediciones y detectar posibles fallas. Para obtener una solución tridimensional de posición y reloj se requieren al menos cuatro satélites; los satélites adicionales proporcionan redundancia para aplicar detección de fallas (**FD**) o detección y exclusión de fallas (**FDE**) [9].

De acuerdo con [23], los métodos clásicos de RAIM incluyen el método de comparación de distancias, el método de residuos por mínimos cuadrados y el método del espacio de paridad. Estos enfoques suelen partir de un modelo linealizado de pseudorango:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x}_{\text{true}} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2.38}$$

donde $\mathbf{y}$ es el vector de observaciones menos calculadas, $\mathbf{G}$ es la matriz de geometría o matriz de diseño, $\mathbf{x}_{\text{true}}$ contiene las correcciones de posición y reloj, y $\boldsymbol{\varepsilon}$ agrupa los errores de observación.

En el método de residuos por mínimos cuadrados, la solución se obtiene como:

$$\hat{\mathbf{x}}_{LS} = \left(\mathbf{G}^T\mathbf{G}\right)^{-1}\mathbf{G}^T\mathbf{y}. \tag{2.39}$$

Las observaciones predichas se calculan mediante:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{LS}, \tag{2.40}$$

y el vector de residuos se obtiene como:

$$\mathbf{w} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}. \tag{2.41}$$

Sustituyendo la solución de mínimos cuadrados, el vector de residuos puede expresarse como:

$$\mathbf{w} = \left[\mathbf{I} - \mathbf{G}\left(\mathbf{G}^T\mathbf{G}\right)^{-1}\mathbf{G}^T\right]\mathbf{y}. \tag{2.42}$$

A partir de los residuos se calcula el estadístico **SSE**, por sus siglas en inglés *Sum of Squared Errors*:

$$SSE = \mathbf{w}^T \mathbf{w}. \tag{2.43}$$

Valores elevados de SSE indican una mayor discrepancia entre las observaciones y el modelo de posicionamiento, lo que puede asociarse con una falla en alguna medición. El valor obtenido se compara con un umbral estadístico; si el umbral se supera, el algoritmo declara la posible presencia de una falla y la solución deja de considerarse íntegra [23].

2.7. Indicadores de calidad de las observaciones

Para evaluar la calidad de las observaciones GNSS es necesario analizar indicadores que permitan determinar la confiabilidad de los datos registrados y detectar posibles anomalías. Entre los principales indicadores se encuentran el multicamino, la relación señal-ruido, los residuales de pseudorango y fase portadora, el ángulo de elevación, el azimut de los satélites, la disponibilidad de observaciones y los parámetros de geometría satelital.

2.7.1. Indicadores de multicamino

El multicamino ocurre cuando la señal GNSS llega a la antena receptora por una trayectoria directa y por trayectorias reflejadas en superficies cercanas. Este fenómeno altera las observaciones de código y fase, aunque suele afectar con mayor intensidad al pseudorango. En herramientas de control de calidad como **TEQC**, los indicadores *MP1* y *MP2* permiten estimar el efecto de multicamino en las frecuencias L1 y L2 [24].

Las combinaciones utilizadas para calcular *MP1* y *MP2* pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} MP1 &= P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_1 + \frac{2}{\alpha - 1}\Phi_2, \\ MP2 &= P_2 - \frac{2\alpha}{\alpha - 1}\Phi_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)\Phi_2, \end{aligned} \tag{2.44}$$

donde P_1 y P_2 representan las observaciones de pseudorango en las frecuencias L1 y L2, Φ_1 y Φ_2 representan las observaciones de fase portadora expresadas en unidades de longitud, y α es la razón entre los cuadrados de las frecuencias:

$$\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2. \tag{2.45}$$

Los valores elevados de *MP1* o *MP2* pueden indicar presencia de superficies reflectantes, obstrucciones parciales o cambios en el entorno de la antena. Por ello, estos indicadores son útiles para identificar degradaciones en la calidad de las observaciones GNSS [25].

2.7.2. Relación señal-ruido

La relación señal-ruido, conocida como **SNR** por sus siglas en inglés *Signal-to-Noise Ratio*, es un indicador de la intensidad de la señal recibida respecto al ruido presente durante la observación. De manera general puede escribirse como:

$$\text{SNR} = \frac{\text{potencia de la señal}}{\text{potencia del ruido}}. \tag{2.46}$$

En observaciones GNSS, la SNR suele expresarse en decibelios-hertz (dB-Hz). Valores altos indican señales de mejor calidad, mientras que valores bajos pueden estar asociados con obstrucciones, interferencias, baja elevación satelital o condiciones desfavorables de recepción [26].

Además de representar la intensidad de la señal, la SNR puede utilizarse como indicador indirecto de multicamino. Cuando existen señales reflejadas, el receptor rastrea una señal compuesta por la suma de la trayectoria directa y las trayectorias reflejadas, lo que produce variaciones en la SNR y puede afectar las observaciones de fase y pseudorango [27].

2.7.3. Residuales de pseudorango en procesamiento PPP

El residual de pseudorango representa la diferencia entre la observación de código medida por el receptor y el valor calculado mediante el modelo de procesamiento PPP. En los archivos generados por **GIPSY/GipsyX**, este residual se identifica mediante el observable `IonoFreeC_1W_2W`, el cual corresponde a una combinación libre de ionosfera formada a partir de observaciones de código.

De forma general, el residual de pseudorango puede escribirse como:

$$v_{R,i}^{k} = R_{i,\mathrm{obs}}^{k} - R_{i,\mathrm{calc}}^{k}, \tag{2.47}$$

donde $v_{R,i}^{k}$ es el residual de pseudorango para el receptor i y el satélite k, $R_{i,\mathrm{obs}}^{k}$ representa el pseudorango observado y $R_{i,\mathrm{calc}}^{k}$ corresponde al pseudorango calculado mediante el modelo PPP.

Para una observación de pseudorango, el residual puede expresarse de forma extendida como:

$$\begin{aligned} v_{R,i}^{k} = R_{i,\mathrm{obs}}^{k} - \Big[& \rho_{i}^{k} - c\left(\delta t_{i} - \delta t^{k}\right) + \delta_{\mathrm{ion},i}^{k} + \delta_{\mathrm{trop},i}^{k} \\ & + \delta_{\mathrm{tide},i}^{k} + \delta_{\mathrm{rel},i}^{k} + \delta_{\mathrm{orb},i}^{k} + \delta_{\mathrm{ant},i}^{k} \Big]. \end{aligned} \tag{2.48}$$

En esta expresión, ρ_{i}^{k} es la distancia geométrica entre el receptor y el satélite; c es la velocidad de la luz; δt_{i} y δt^{k} representan los errores de reloj del receptor y del satélite, respectivamente; $\delta_{\mathrm{ion},i}^{k}$ es el retardo ionosférico; $\delta_{\mathrm{trop},i}^{k}$ es el retardo troposférico; $\delta_{\mathrm{tide},i}^{k}$ representa las correcciones asociadas a efectos de marea; $\delta_{\mathrm{rel},i}^{k}$ corresponde a las correcciones relativistas; $\delta_{\mathrm{orb},i}^{k}$ representa errores residuales asociados a la órbita satelital, y $\delta_{\mathrm{ant},i}^{k}$ agrupa efectos relacionados con el centro de fase de la antena y otros sesgos instrumentales.

Debido a que en este trabajo se utilizó la combinación libre de ionosfera `IonoFreeC_1W_2W`, el efecto ionosférico de primer orden se reduce mediante la combinación de frecuencias. Por ello, el residual de pseudorango obtenido con **GIPSY/GipsyX** representa principalmente la parte de la observación que no es explicada por el modelo PPP

después de aplicar las correcciones correspondientes. Valores elevados de $v_{R,i}^k$ pueden asociarse con ruido de código, multicamino, baja elevación satelital, errores atmosféricos residuales, pérdida parcial de seguimiento o posibles anomalías en la señal recibida.

2.7.4. Residuales de fase portadora en procesamiento PPP

El residual de fase portadora representa la diferencia entre la observación de fase medida por el receptor y el valor calculado mediante el modelo PPP. En los archivos generados por **GIPSY/GipsyX**, este residual se identifica mediante el observable `IonoFreeL_1W_2W`, correspondiente a una combinación libre de ionosfera formada a partir de observaciones de fase portadora.

De forma general, el residual de fase portadora puede escribirse como:

$$v_{\Phi,i}^k = \Phi_{i,\text{obs}}^k - \Phi_{i,\text{calc}}^k, \tag{2.49}$$

donde $v_{\Phi,i}^k$ es el residual de fase portadora para el receptor i y el satélite k, $\Phi_{i,\text{obs}}^k$ representa la fase portadora observada y $\Phi_{i,\text{calc}}^k$ corresponde a la fase calculada mediante el modelo PPP.

Expresada en unidades de longitud, la ecuación extendida del residual de fase portadora puede escribirse como:

$$\begin{aligned} v_{\Phi,i}^k = \Phi_{i,\text{obs}}^k - \Big[& \rho_i^k - c\left(\delta t_i - \delta t^k\right) - I_i^k + T_i^k \\ & + \delta_{\text{tide},i}^k + \delta_{\text{rel},i}^k + \delta_{\text{orb},i}^k + \delta_{\text{ant},i}^k + \lambda N_i^k \Big]. \end{aligned} \tag{2.50}$$

En esta ecuación, ρ_i^k es la distancia geométrica entre el receptor y el satélite; $c\left(\delta t_i - \delta t^k\right)$ representa el efecto combinado de los relojes del receptor y del satélite; I_i^k corresponde al efecto ionosférico sobre la fase portadora, el cual aparece con signo opuesto al pseudorango debido al avance de fase; T_i^k es el retardo troposférico; $\delta_{\text{tide},i}^k$ representa las correcciones por efectos de marea; $\delta_{\text{rel},i}^k$ corresponde a las correcciones relativistas; $\delta_{\text{orb},i}^k$ representa errores residuales asociados a las órbitas; $\delta_{\text{ant},i}^k$ agrupa

efectos de antena y sesgos instrumentales; λ es la longitud de onda de la señal portadora, y N_i^k es la ambigüedad de fase.

En el procesamiento realizado con **GIPSY/GipsyX**, el residual de fase portadora se obtiene después de aplicar los modelos y correcciones del procesamiento PPP, así como la estimación de los parámetros necesarios del modelo. Debido a que la fase portadora es mucho más precisa que el pseudorango, sus residuales suelen tener magnitudes menores y se analizan comúnmente en milímetros. Valores anómalos, discontinuidades o cambios abruptos en $v_{\Phi,i}^k$ pueden indicar saltos de ciclo, pérdida de enganche, multicamino, errores residuales en la estimación de ambigüedades o problemas en el seguimiento de la señal.

2.7.5. Combinación libre de ionosfera como indicador de calidad

La combinación libre de ionosfera es un observable formado a partir de mediciones en dos frecuencias. Su objetivo principal es eliminar el efecto ionosférico de primer orden; sin embargo, también puede utilizarse como indicador de calidad, ya que permite analizar la consistencia entre observaciones multifrecuencia y detectar comportamientos anómalos asociados con la propagación de la señal [26].

2.7.6. Derivada del efecto ionosférico con respecto al tiempo

La derivada del efecto ionosférico respecto al tiempo representa la tasa de cambio del retraso ionosférico durante el periodo de observación y suele expresarse en metros por minuto. Este indicador permite evaluar la estabilidad de las condiciones ionosféricas, ya que variaciones rápidas pueden indicar perturbaciones que afectan la propagación de las señales GNSS [26].

2.7.7. Ángulo de elevación y azimut de los satélites

El ángulo de elevación y el azimut son parámetros geométricos que describen la posición aparente de un satélite con respecto al receptor. Aunque no constituyen

observaciones GNSS propiamente dichas, permiten caracterizar las condiciones bajo las cuales se recibe la señal y, por tanto, son indicadores importantes de calidad.

El ángulo de elevación influye directamente en la magnitud de errores como el retraso atmosférico y el multicamino. Las señales de baja elevación atraviesan una mayor trayectoria atmosférica y son más susceptibles a reflexiones y obstrucciones. Por su parte, el azimut permite identificar la dirección desde la cual se recibe la señal, lo que facilita relacionar anomalías con posibles obstáculos o superficies reflectantes alrededor de la antena.

El azimut se mide en grados en sentido horario a partir del norte geográfico. La elevación se mide desde el plano del horizonte local hasta la dirección del satélite; un satélite en el cenit presenta una elevación de 90°, mientras que uno sobre el horizonte tiene una elevación de 0° [26].

Para determinar estos parámetros es necesario conocer la posición del satélite y la posición del receptor en el sistema geocéntrico terrestre ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*). El sistema ECEF es un sistema cartesiano tridimensional cuyo origen coincide con el centro de masa de la Tierra. El eje z está alineado con el eje medio de rotación terrestre, el eje x apunta hacia el meridiano de Greenwich y el eje y completa un sistema de mano derecha [10].

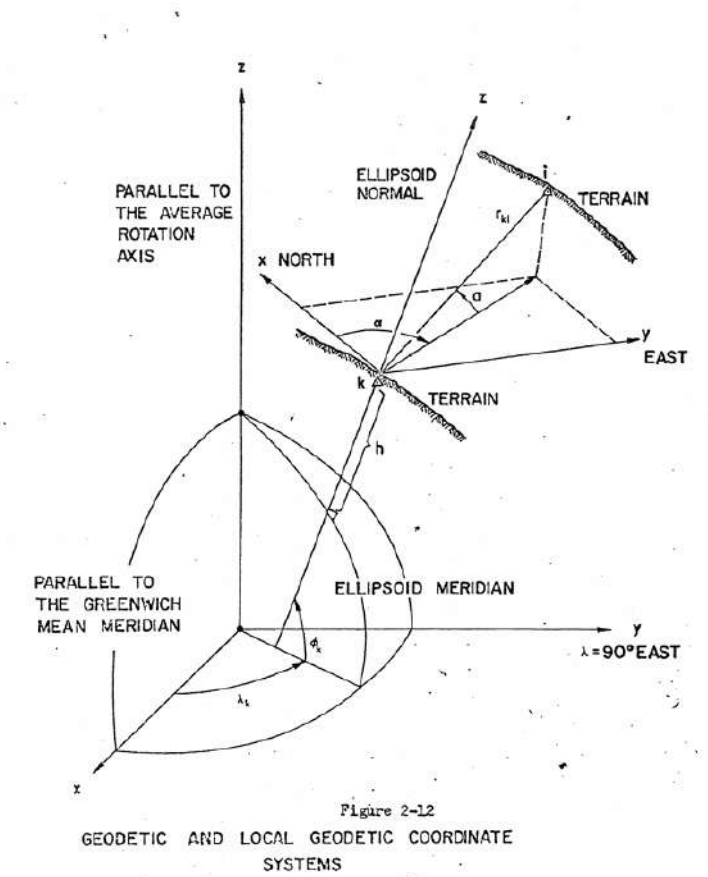


Figura 2.1: Sistema de coordenadas geocéntrico terrestre ECEF.

Una vez conocidas las coordenadas del satélite y del receptor, se construye el vector satélite–receptor. Para interpretar la posición aparente del satélite desde la estación, este vector se transforma a un sistema topocéntrico local, cuyo origen coincide con el receptor. En este sistema, los ejes se orientan hacia el este, norte y vertical local.

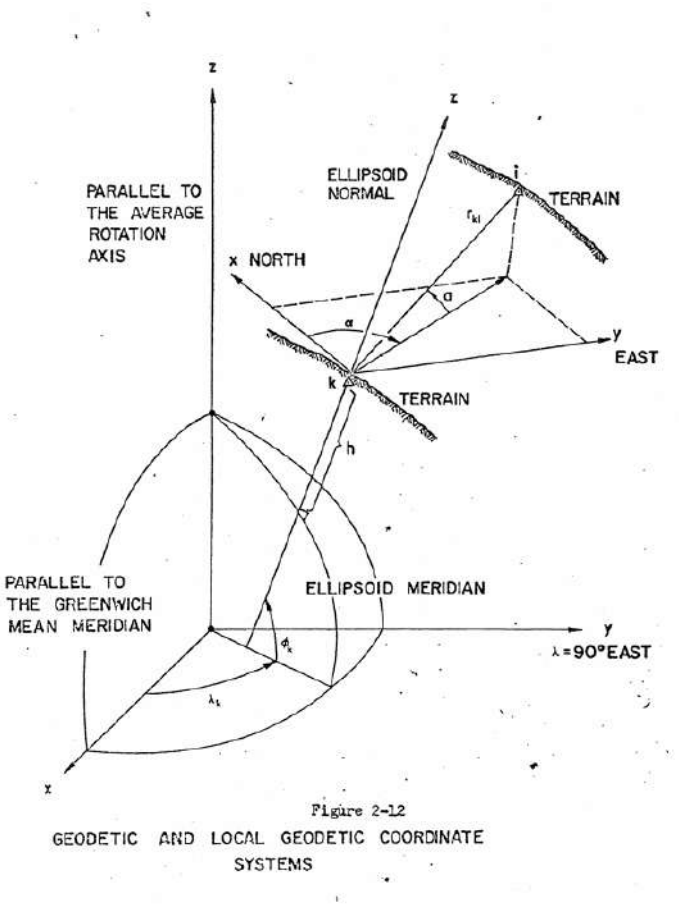


Figura 2.2: Sistema de coordenadas topocéntrico local.

La transformación entre el sistema global y el sistema local puede expresarse mediante matrices de rotación y reflexión. Siguiendo la formulación de Wells y Krakiwsky [28]:

$$(\bar{\mathbf{r}}_{AP})_G = R_3\,(180^\circ - \lambda)\,R_2\,(90^\circ - \phi)\,P_2\,(\bar{\mathbf{r}}_{AP})_L\,, \tag{2.51}$$

donde R_2 y R_3 son matrices de rotación, P_2 es una matriz de reflexión, y ϕ y λ representan la latitud y longitud geodésicas de la estación. Una vez expresado el vector en el sistema local, puede describirse mediante la distancia r_{AP}, el ángulo de elevación a y el azimut α:

$$(\bar{\mathbf{r}}_{AP})_L = r_{AP} \begin{bmatrix} \cos a \cos \alpha \\ \cos a \sin \alpha \\ \sin a \end{bmatrix}. \tag{2.52}$$

De esta manera, el vector satélite–receptor queda descrito en términos de parámetros geométricos directamente interpretables desde la estación.

2.8. Algoritmo para la detección de anomalías

Una vez obtenidos los indicadores de calidad de las observaciones GNSS, es necesario aplicar técnicas que permitan identificar comportamientos anómalos dentro de las series temporales. En el contexto del monitoreo de una estación CORS, una anomalía puede entenderse como una observación, época o conjunto de observaciones cuyo comportamiento se aparta significativamente del patrón esperado. Estas anomalías pueden estar asociadas con degradación de la señal, multicamino, obstrucciones temporales, errores atmosféricos residuales, saltos de ciclo, fallas instrumentales, errores de modelado o cambios en el entorno de la antena.

Existen diversos enfoques para la detección de anomalías, desde métodos estadísticos clásicos hasta técnicas de aprendizaje automático. Entre los métodos estadísticos se encuentran umbrales basados en desviación estándar, pruebas de hipótesis, análisis de cuantiles, estimadores robustos y métodos basados en percentiles. Por otro lado, los métodos de aprendizaje automático incluyen agrupamiento, máquinas de soporte vectorial de una clase, bosques de aislamiento, redes neuronales y autoencoders. En particular, los autoencoders han sido utilizados recientemente para identificar anomalías en indicadores de calidad GNSS de estaciones CORS [29]. En esta tesis se utiliza un criterio basado en percentiles debido a su simplicidad, interpretabilidad y facilidad de implementación.

El uso de percentiles permite establecer límites empíricos a partir de la distribución de los datos, sin asumir necesariamente que todos los indicadores siguen una distribución normal. Si una variable aleatoria X tiene función de distribución acumulada

$F_X(x)$, el percentil p se define como el valor x_p que satisface [30]:

$$F_X(x_p) = P(X \leq x_p) = p. \tag{2.53}$$

Por ejemplo, el percentil 99, denotado como P_{99}, representa el valor por debajo del cual se encuentra el 99 % de las observaciones. Si x_j representa el valor de un indicador de calidad en la época j, un criterio unilateral para clasificar una observación como anómala puede escribirse como [31]:

$$x_j > P_{99}(X). \tag{2.54}$$

Este criterio es adecuado para indicadores en los que las anomalías se manifiestan como valores altos, por ejemplo, multicamino, magnitud de residuales, errores de posición, valores DOP elevados o pérdidas en la calidad de la señal. Cuando el indicador puede presentar anomalías positivas y negativas, como ocurre con residuales firmados de pseudorango o fase portadora, es conveniente utilizar un criterio bilateral:

$$x_j < P_{0.5}(X) \quad \text{o} \quad x_j > P_{99.5}(X). \tag{2.55}$$

Con este criterio se conserva aproximadamente el 99 % central de la distribución y se consideran anómalos los valores ubicados en las colas. Alternativamente, si se trabaja con la magnitud absoluta de los residuales, el criterio puede expresarse como:

$$|x_j| > P_{99}(|X|). \tag{2.56}$$

Para comparar indicadores con unidades y escalas distintas, se aplica una normalización estándar. Para un indicador x_j, el valor normalizado se define como:

$$z_j = \frac{x_j - \mu_X}{\sigma_X}, \tag{2.57}$$

donde z_j es el valor normalizado, μ_X es la media del indicador y σ_X es su desviación estándar. Bajo una distribución aproximadamente normal, el percentil 99 de una variable normal estándar Z se encuentra aproximadamente en:

$$P_{99}(Z) \approx 2.326. \tag{2.58}$$

En el caso de residuales de pseudorango, también puede considerarse una normalización dependiente de la elevación del satélite, ya que las observaciones de baja elevación suelen presentar mayor ruido, mayor trayectoria atmosférica y mayor susceptibilidad al multicamino. Sea $v_{R,i}^k$ el residual de pseudorango correspondiente al receptor i y al satélite k. El residual normalizado por elevación puede expresarse como:

$$\tilde{v}_{R,i}^k = \frac{v_{R,i}^k}{\sigma_R(E_i^k)}, \tag{2.59}$$

donde E_i^k es el ángulo de elevación del satélite y $\sigma_R(E_i^k)$ representa un modelo de desviación estándar dependiente de la elevación. Un modelo común consiste en asignar mayor incertidumbre a observaciones de baja elevación mediante:

$$\sigma_R(E_i^k) = \frac{\sigma_0}{\sin(E_i^k)}, \tag{2.60}$$

donde σ_0 representa una desviación estándar nominal. De esta forma, los residuales asociados a satélites de baja elevación se ponderan considerando que, de manera natural, tienden a presentar mayor dispersión.

El procedimiento general aplicado consiste en construir series temporales de los indicadores de calidad GNSS, analizar su distribución, normalizar los valores cuando sea necesario, calcular umbrales basados en percentiles e identificar como anómalas las épocas que superan dichos límites. Bajo un criterio unilateral superior, el conjunto de anomalías se define como:

$$\mathcal{A} = \{j : z_j > P_{99}(Z)\}, \tag{2.61}$$

mientras que para un criterio bilateral se define como:

$$\mathcal{A} = \{j : z_j < P_{0.5}(Z) \quad \text{o} \quad z_j > P_{99.5}(Z)\}. \tag{2.62}$$

La Figura 2.3 muestra de manera conceptual una distribución normal estándar y los límites correspondientes a los percentiles utilizados para detectar valores extremos.

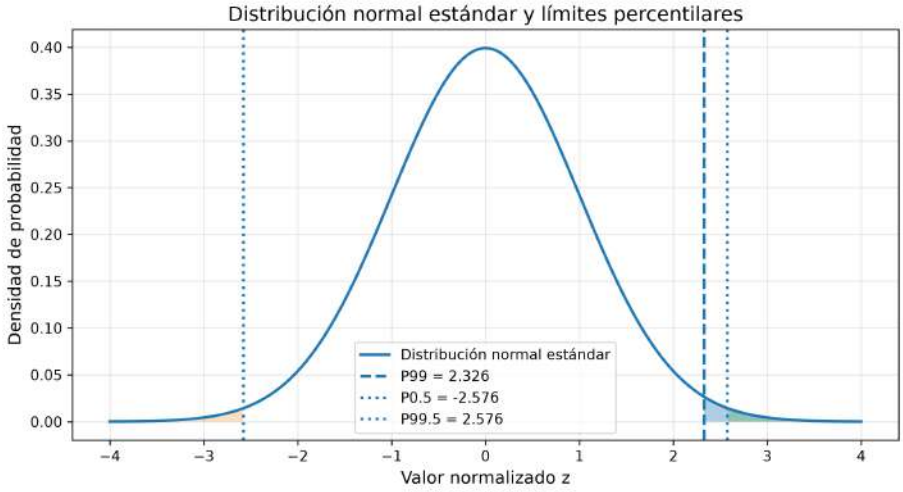


Figura 2.3: Distribución normal estándar y límites basados en percentiles para la detección de valores extremos.

La Figura 2.4 muestra un ejemplo de distribución empírica de un indicador GNSS normalizado. El histograma permite observar la concentración de valores alrededor de la media, mientras que los límites percentilares identifican las observaciones ubicadas en las colas de la distribución.

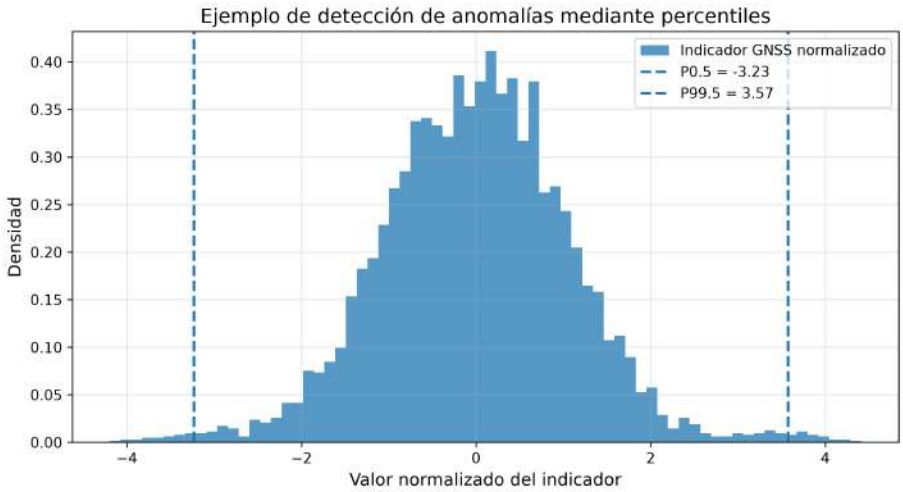


Figura 2.4: Ejemplo de histograma de un indicador GNSS normalizado y límites percentilares para la identificación de anomalías.

La ventaja principal del método basado en percentiles es que no requiere defi-

nir un umbral físico fijo para todos los indicadores. En su lugar, el límite se obtiene directamente de la distribución de los datos. Esto resulta útil en monitoreo GNSS, ya que cada indicador puede tener una escala y comportamiento temporal distinto. No obstante, si el conjunto utilizado para calcular los percentiles contiene una gran cantidad de anomalías, el umbral puede desplazarse y reducir la capacidad de detección. Por ello, la detección estadística debe interpretarse junto con otros indicadores, como elevación, azimut, SNR, multicamino, DOP, residuales PPP y disponibilidad de observaciones.

En este capítulo se presentaron los fundamentos teóricos necesarios para comprender el monitoreo de calidad de observaciones GNSS en una estación CORS. Se describieron los segmentos de los sistemas GNSS, las principales fuentes de error, los métodos de posicionamiento SPP, PPP, diferencial y RTK, así como la resolución de ambigüedades de fase portadora. También se explicaron las correcciones orbitales, de reloj, ionosféricas, troposféricas y de sesgos, además de los conceptos de integridad y los principales indicadores de calidad. Finalmente, se introdujo el criterio estadístico basado en percentiles que se utilizará posteriormente para la detección de anomalías en las series temporales generadas durante el procesamiento de los datos.

Capítulo 3

Metodología para el monitoreo de los datos GNSS

En el capítulo anterior se describieron los fundamentos relacionados con la calidad e integridad de los datos GNSS. Se presentaron los principales errores que afectan las observaciones, los métodos de posicionamiento, la resolución de ambigüedades, las correcciones utilizadas en técnicas de posicionamiento preciso y los indicadores empleados para evaluar la calidad de los datos.

En este capítulo se describe la metodología aplicada para el monitoreo de la calidad de las observaciones GNSS registradas por la estación CORS de la Facultad de Ingeniería. Primero se presenta una descripción general de la estación y de los datos utilizados. Posteriormente, se explican los archivos RINEX procesados, la preparación de los datos mediante **GFZRNX** y el uso de los programas **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX** como herramientas principales para el cálculo de indicadores de calidad, residuales y soluciones de posición.

3.1. Descripción de la estación CORS de la Facultad de Ingeniería

La estación CORS de la Facultad de Ingeniería se encuentra instalada en la azotea del edificio B del Conjunto Norte, en Ciudad Universitaria. El receptor utilizado es un **South Net S9**, el cual registra observaciones GNSS de forma continua y permite almacenar los datos en archivos RINEX en las versiones 2.11 y 3.04.

El almacenamiento de datos en formato RINEX 2.11 se mantiene debido a que, durante el desarrollo de este trabajo, la estación se encontraba en proceso de incorporación a la **Red Geodésica Nacional Activa** (**RGNA**), administrada por el **INEGI**. Dicha versión forma parte de los requerimientos solicitados para la integración de la estación a la red. Por otro lado, los archivos RINEX 3.04 permiten aprovechar una descripción más completa de las señales GNSS modernas, ya que esta versión identifica de forma explícita la constelación, frecuencia y tipo de observación registrada.

La estación registra observaciones de diferentes constelaciones GNSS, lo cual permite evaluar su comportamiento en un entorno multiconstelación. Los datos generados por esta estación constituyen la base del análisis desarrollado en esta tesis, cuyo objetivo es calcular indicadores de calidad y detectar posibles comportamientos anómalos en las observaciones.

3.2. Datos GNSS analizados

Los datos analizados corresponden a un periodo de siete días consecutivos de observación, comprendido entre el 20 de mayo de 2026 a las 00:00 h GPS y el 26 de mayo de 2026 a las 23:59 h GPS. Durante este periodo se utilizaron archivos RINEX en sus versiones 2.11 y 3.04, con el fin de evaluar la calidad de las observaciones mediante diferentes herramientas de procesamiento.

Los archivos RINEX 2.11 se utilizaron principalmente para el procesamiento con **TEQC**, debido a que dicho programa trabaja con esta versión del formato. Por su par-

te, los archivos RINEX 3.04 se emplearon en el procesamiento con **G-Nut/Anubis**, ya que esta herramienta permite analizar de forma más detallada las observaciones multiconstelación y multifrecuencia.

3.2.1. Archivos RINEX

El *Receiver Independent Exchange Format* (**RINEX**) es un formato estándar desarrollado para almacenar e intercambiar observaciones GNSS de manera independiente del fabricante del receptor. Antes de su creación, cada fabricante utilizaba formatos propietarios, lo que dificultaba el procesamiento conjunto de datos obtenidos con equipos diferentes. RINEX surgió como una solución a este problema, permitiendo que la información registrada por distintos receptores pudiera ser utilizada en programas compatibles con el estándar [32].

Los archivos RINEX almacenan información necesaria para el procesamiento GNSS, incluyendo observaciones de pseudorango, fase portadora, Doppler e intensidad de señal, así como datos de navegación y metadatos de la estación. Dependiendo de su contenido, pueden clasificarse en archivos de observación, navegación, meteorología, reloj y otros productos auxiliares. En esta tesis se utilizaron principalmente archivos de observación y navegación, debido a que contienen la información necesaria para evaluar la calidad de los datos registrados por la estación.

RINEX 2.11

La versión 2.11 del formato RINEX constituye una actualización del estándar diseñado para facilitar el intercambio de observaciones GNSS entre receptores y programas de procesamiento. Su principal objetivo es proporcionar una estructura común que permita procesar los datos de forma independiente del equipo utilizado para su adquisición [32].

Esta versión permite almacenar observaciones de pseudorango, fase portadora, Doppler e intensidad de señal, además de información del receptor, la antena y la estación mediante un encabezado estandarizado. Aunque RINEX 2.11 representó un

avance importante para la estandarización de los datos GNSS, el incremento en el número de constelaciones y señales disponibles hizo necesario el desarrollo de versiones posteriores, como RINEX 3, con una nomenclatura más detallada para identificar señales modernas [32].

En este trabajo, los archivos RINEX 2.11 se utilizaron para el procesamiento con **TEQC**, debido a que esta herramienta fue diseñada para trabajar principalmente con archivos RINEX de esta generación.

RINEX 3.04

La versión 3.04 del formato RINEX fue desarrollada como respuesta a la evolución de los sistemas GNSS y al incremento en el número de constelaciones y señales disponibles. A diferencia de RINEX 2.11, cuyo diseño estuvo orientado inicialmente al sistema GPS, RINEX 3.04 permite describir observaciones provenientes de múltiples constelaciones, incluyendo GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, IRNSS y SBAS [33].

Una de sus principales ventajas es la implementación de una nomenclatura estandarizada para identificar cada observación mediante el sistema de navegación, la banda de frecuencia y el tipo de señal registrada. Esta característica permite distinguir entre diferentes señales transmitidas por un mismo satélite y facilita el análisis de datos multiconstelación y multifrecuencia.

En esta tesis, los archivos RINEX 3.04 se utilizaron para el procesamiento con **G-Nut/Anubis**, ya que esta herramienta permite aprovechar la información detallada contenida en este formato y separar los indicadores de calidad por constelación, señal y satélite.

3.2.2. Preparación y unión de archivos RINEX

Para preparar los datos utilizados en este trabajo se empleó el software **GFZRNX**, desarrollado por el *Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences*. Esta herramienta permite manipular, convertir, validar y combinar ar-

chivos RINEX de observación, navegación y meteorología, y es compatible con las versiones RINEX 2, 3 y 4 [34].

En el caso de los archivos RINEX 2.11, **GFZRNX** se utilizó para unir los archivos correspondientes a los siete días analizados. El procedimiento permitió concatenar los archivos de observación y los archivos de navegación por constelación, generando un conjunto de archivos integrados para el procesamiento posterior con **TEQC**. De esta forma, se obtuvieron cuatro archivos principales: un archivo de observación y tres archivos de navegación asociados a las constelaciones disponibles en la versión RINEX 2.11 utilizada.

Además de la unión de archivos, **GFZRNX** permite realizar tareas de revisión formal mediante la opción `-chk`, conservar la versión original del archivo mediante `-kv`, modificar encabezados, cambiar intervalos de muestreo, seleccionar satélites u observables, convertir entre versiones RINEX y extraer intervalos temporales específicos. Estas funciones son útiles para preparar los datos antes de aplicar procesos de control de calidad o posicionamiento.

En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo del comando utilizado para unir los archivos RINEX correspondientes al periodo de análisis. En este trabajo, dicho procedimiento fue incorporado a un script con el objetivo de automatizar la preparación de los datos.

```
let mut args: Vec<String> = vec![
    "+plot".to_string(),
    "+ion".to_string(),
    "+iod".to_string(),
    "+mp".to_string(),
    "+sn".to_string(),
    "+qc".to_string(),
];

if !nav_names.is_empty() {
    args.push("-nav".to_string());
    args.push(nav_names.join(","));
}

args.push(obs_name);

println!("\nEjecutando TEQC:");
println!("  {} {}", TEQC_BIN, args.join(" "));

let output = Command::new(TEQC_BIN)
    .current_dir(run_dir)
    .args(&args)
    .output()?;

fs::write(run_dir.join("teqc_stdout_short_report.txt"), &output.stdout)?;
fs::write(run_dir.join("teqc_stderr.txt"), &output.stderr)?;
```

Figura 3.1: Ejemplo de comando utilizado con **GFZRNX** para unir los archivos RINEX analizados.

3.3. Software de procesamiento utilizado

Para el desarrollo de la metodología se emplearon tres herramientas principales: **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX**. Cada una se utilizó con un propósito específico dentro del flujo de procesamiento. **TEQC** permitió realizar el control de calidad de archivos RINEX 2.11; **G-Nut/Anubis** permitió analizar archivos RINEX 3.04 con mayor detalle por constelación, señal y satélite; y **GIPSY/GipsyX** se utilizó para obtener residuales de pseudorango, residuales de fase portadora y variaciones de posición mediante procesamiento PPP.

3.3.1. TEQC

TEQC es un software especializado en el procesamiento de datos GNSS desarrollado por **UNAVCO**. Su nombre proviene de sus tres funciones principales: *Translation*, *Editing* y *Quality Checking*. Estas funciones permiten traducir archivos GNSS, editar archivos en formatos como BINEX y RINEX, y realizar verificaciones de calidad sobre los datos observados.

En este trabajo, **TEQC** se utilizó para procesar los archivos RINEX 2.11 correspondientes al periodo de siete días de observación. El objetivo principal fue obtener indicadores de calidad como el efecto de multicamino en las combinaciones *MP1* y *MP2*, la relación señal-ruido, los saltos de ciclo, la disponibilidad de observaciones y otros parámetros resumidos en el reporte de calidad generado por el programa.

Aunque **TEQC** puede calcular una posición aproximada de la antena, este programa no está diseñado para realizar posicionamiento preciso. La posición calculada se utiliza únicamente como apoyo para estimar la geometría entre la antena receptora y los satélites observados. Por esta razón, en esta tesis **TEQC** se emplea como herramienta de control de calidad y no como software de posicionamiento.

Los resultados de **TEQC** se generan principalmente en reportes de texto y gráficas ASCII. Debido a que estas salidas pueden ser difíciles de interpretar visualmente, se desarrollaron scripts en Python para extraer la información relevante y generar gráficas más claras de los indicadores calculados. En la Figura 3.2 se muestra un

ejemplo del reporte generado por **TEQC** para el archivo RINEX 2.11 correspondiente al periodo analizado.

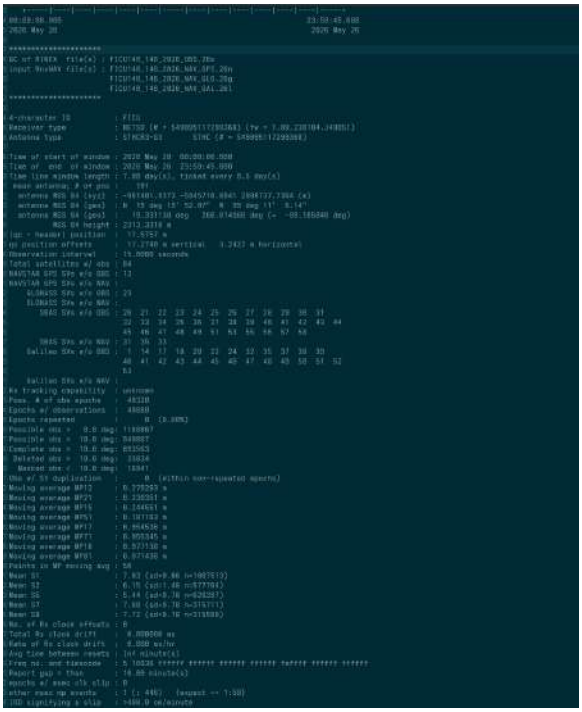


Figura 3.2: Ejemplo de reporte generado por **TEQC** para el análisis de calidad de archivos RINEX 2.11.

3.3.2. G-Nut/Anubis

G-Nut/Anubis es una herramienta desarrollada por el **Geodetic Observatory Pecný** (GOP), perteneciente al Instituto de Investigación Geodésica, Topográfica y Cartográfica de la República Checa, en colaboración con **G-Nut Software**. Su desarrollo respondió a la necesidad de contar con una herramienta moderna de control de calidad compatible con nuevas constelaciones, señales GNSS y versiones recientes del formato RINEX.

Esta herramienta permite analizar archivos de observación y navegación en formatos RINEX 2 y RINEX 3, proporcionando indicadores cuantitativos y cualitativos sobre la calidad de los datos. Entre sus capacidades se encuentran la evaluación de disponibilidad de observaciones, continuidad temporal, relación señal-ruido, multicamino, elevación, azimut, geometría satelital, salud de los satélites y consistencia de

metadatos [35].

En esta tesis, **G-Nut/Anubis** se utilizó para procesar los archivos RINEX 3.04 correspondientes al mismo periodo de siete días analizado con **TEQC**. Su uso permitió complementar el análisis anterior, ya que los archivos RINEX 3.04 contienen una identificación más detallada de las señales y constelaciones observadas. Esto permitió generar indicadores separados por constelación, satélite y tipo de señal.

Al igual que **TEQC**, **G-Nut/Anubis** funciona mediante una interfaz de línea de comandos, lo cual facilita su integración en flujos de procesamiento automatizados. En este trabajo se desarrolló una rutina para ejecutar el procesamiento de forma organizada, generar productos intermedios y extraer la información necesaria para construir gráficas y tablas de análisis. Los resultados obtenidos con **G-Nut/Anubis** fueron utilizados para caracterizar la disponibilidad, continuidad, calidad de señal, multicamino y geometría de las observaciones GNSS de la estación CORS FICU.

3.3.3. GIPSY/GipsyX

GIPSY/GipsyX es un conjunto de herramientas de procesamiento geodésico desarrollado por el **Jet Propulsion Laboratory** (**JPL**) de la **NASA**. De acuerdo con [1], **GipsyX** representa una evolución del software GIPSY-OASIS y de las herramientas RTG/RTGx desarrolladas por el JPL para aplicaciones de geodesia espacial, posicionamiento preciso, navegación y procesamiento GNSS.

En esta tesis, **GIPSY/GipsyX** se utilizó como herramienta de procesamiento PPP para obtener residuales de pseudorango, residuales de fase portadora y soluciones de posición de la estación CORS FICU. A diferencia de **TEQC** y **G-Nut/Anubis**, cuyo propósito principal es el control de calidad de archivos RINEX, **GIPSY/GipsyX** permite realizar un procesamiento geodésico más completo, incorporando productos precisos, modelos físicos y parámetros estimados dentro del ajuste.

El procesamiento con **GIPSY/GipsyX** se aplicó únicamente a un día completo de observaciones. Esta decisión se tomó debido a la mayor demanda computacional del procesamiento PPP y a que, para fines metodológicos, un día de datos fue suficiente para mostrar el procedimiento de obtención y análisis de residuales. Los resul-

tados generados permiten complementar el análisis de calidad realizado con **TEQC** y **G-Nut/Anubis**, ya que los residuales de observación muestran directamente la discrepancia entre las mediciones registradas y el modelo de procesamiento utilizado.

Para este análisis se trabajó con coordenadas fijas de la estación. Esta estrategia fue seleccionada porque el objetivo no era estimar una nueva posición de la antena, sino evaluar la calidad de las observaciones. Al fijar las coordenadas conocidas de la estación, los errores presentes en las observaciones no son absorbidos por la estimación libre de la posición, sino que se reflejan con mayor claridad en los residuales de pseudorango y fase portadora.

Los productos de **GIPSY/GipsyX** utilizados en esta tesis incluyen archivos de residuales y soluciones de posición. En particular, los residuales identificados como `IonoFreeC_1W_2W` corresponden a observaciones de código o pseudorango en combinación libre de ionosfera, mientras que los residuales identificados como `IonoFreeL_1W_2W` corresponden a observaciones de fase portadora en combinación libre de ionosfera. Estos productos fueron graficados en el dominio del tiempo y analizados estadísticamente para identificar valores atípicos o comportamientos anómalos.

3.4. Flujo general de procesamiento

La metodología implementada en esta tesis se organizó en un flujo de procesamiento orientado al monitoreo de calidad de observaciones GNSS. En primer lugar, se recopilaron los archivos RINEX generados por la estación CORS FICU para el periodo de análisis. Posteriormente, los archivos fueron preparados y organizados de acuerdo con su versión y propósito de procesamiento.

Los archivos RINEX 2.11 fueron unidos mediante **GFZRNX** y procesados con **TEQC** para obtener indicadores globales de calidad. Estos resultados permitieron evaluar la disponibilidad de observaciones, el multicamino, la relación señal-ruido y los saltos de ciclo para el periodo completo de siete días.

De forma complementaria, los archivos RINEX 3.04 fueron procesados con **G-Nut/Anubis**. Este procesamiento permitió analizar los datos con mayor detalle,

separando los indicadores por constelación, señal y satélite. A partir de los productos generados se obtuvieron gráficas de número de satélites, geometría de posicionamiento, elevación, azimut, gráfica de cielo, relación señal-ruido, multicamino y salud satelital.

Finalmente, se utilizó **GIPSY/GipsyX** para procesar un día completo de observaciones mediante PPP con coordenadas fijas. Este procesamiento permitió obtener residuales de pseudorango y fase portadora, así como variaciones de posición en componentes Este, Norte y Vertical. Estos productos se utilizaron como indicadores adicionales para evaluar la calidad de las observaciones desde el dominio de las mediciones y desde el dominio de la posición.

En conjunto, el flujo metodológico permitió integrar herramientas de control de calidad, procesamiento RINEX, análisis estadístico y generación automatizada de gráficas. Esta estructura permite que la metodología pueda replicarse en otros periodos de observación o adaptarse al monitoreo de otras estaciones CORS.

En este capítulo se describió la metodología general utilizada para el monitoreo de calidad de los datos GNSS de la estación CORS FICU. Se presentó la estación de estudio, el periodo de observación, las versiones RINEX utilizadas y el papel de cada herramienta de procesamiento dentro del análisis. Asimismo, se explicó el uso de **GFZRNX** para la preparación de archivos, **TEQC** para el control de calidad de RINEX 2.11, **G-Nut/Anubis** para el análisis detallado de RINEX 3.04 y **GIPSY/GipsyX** para la obtención de residuales y soluciones de posición. Este flujo metodológico constituye la base para la presentación y discusión de los resultados en los capítulos siguientes.

Capítulo 4

Análisis de los resultados

En el capítulo anterior se describió la metodología utilizada para analizar la calidad de las observaciones GNSS de la estación CORS FICU. Se presentó la estación de estudio, el periodo de observación, las versiones RINEX utilizadas y el papel de los programas **GFZRNX**, **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX** dentro del flujo de procesamiento.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de dicha metodología. Los resultados se organizan de acuerdo con el software utilizado y con el tipo de producto generado. En primer lugar, se muestran los indicadores calculados con **TEQC** a partir de archivos RINEX 2.11. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos con **G-Nut/Anubis** a partir de archivos RINEX 3.04, con énfasis en el análisis por constelación, señal y satélite. Finalmente, se describen los residuales de pseudorango, los residuales de fase portadora y las variaciones de posición obtenidas mediante procesamiento PPP con **GIPSY/GipsyX**. Para el caso de **TEQC**, el intervalo de muestreo de los archivos analizados fue de 15 segundos, mientras que para **G-Nut/Anubis** se trabajó con archivos RINEX 3.04 a una resolución temporal de un segundo.

4.1. Resultados obtenidos con TEQC

El procesamiento realizado con **TEQC** permitió obtener indicadores globales de calidad para el periodo de siete días analizado. Entre los productos revisados se encuentran la elevación y el azimut de los satélites, la combinación libre de ionosfera, la variación temporal de dicha combinación, los indicadores de multicamino, la relación señal-ruido, la disponibilidad de observaciones y los saltos de ciclo. Estos resultados constituyen una primera evaluación de la calidad de los archivos RINEX 2.11 registrados por la estación CORS FICU.

4.1.1. Azimut y elevación

En la Figura 4.1 se muestran las elevaciones de los satélites observados por la estación durante el periodo de análisis. Los satélites corresponden a las constelaciones GPS, GLONASS y Galileo. Esta representación permite identificar los intervalos en los que cada satélite fue visible para la estación, así como los periodos en los que las observaciones se realizaron con baja o alta elevación.

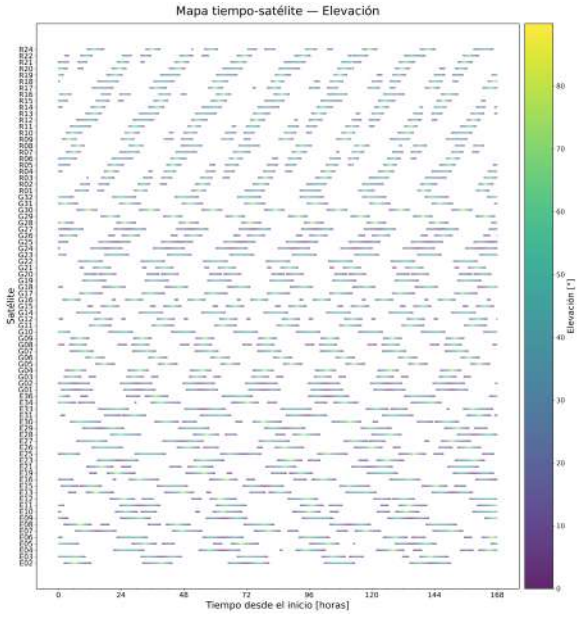


Figura 4.1: Elevación de los satélites observados durante los siete días analizados con **TEQC**.

La elevación satelital es un parámetro relevante para el control de calidad, ya que

las señales provenientes de satélites cercanos al horizonte recorren una trayectoria atmosférica mayor y son más susceptibles a obstrucciones, ruido y multicamino. Por esta razón, los satélites de baja elevación suelen presentar observaciones de menor calidad que aquellos ubicados a mayor altura angular respecto al horizonte local.

En la Figura 4.2 se muestra la gráfica de cielo, o *skyplot*, construida a partir de los valores de azimut y elevación. En esta representación, la estación CORS se ubica en el centro de la figura y las trayectorias satelitales se distribuyen de acuerdo con la dirección de observación. Esta gráfica permite evaluar la cobertura espacial de los satélites alrededor de la antena e identificar posibles direcciones con ausencia de observaciones o con trayectorias dominantes de baja elevación.

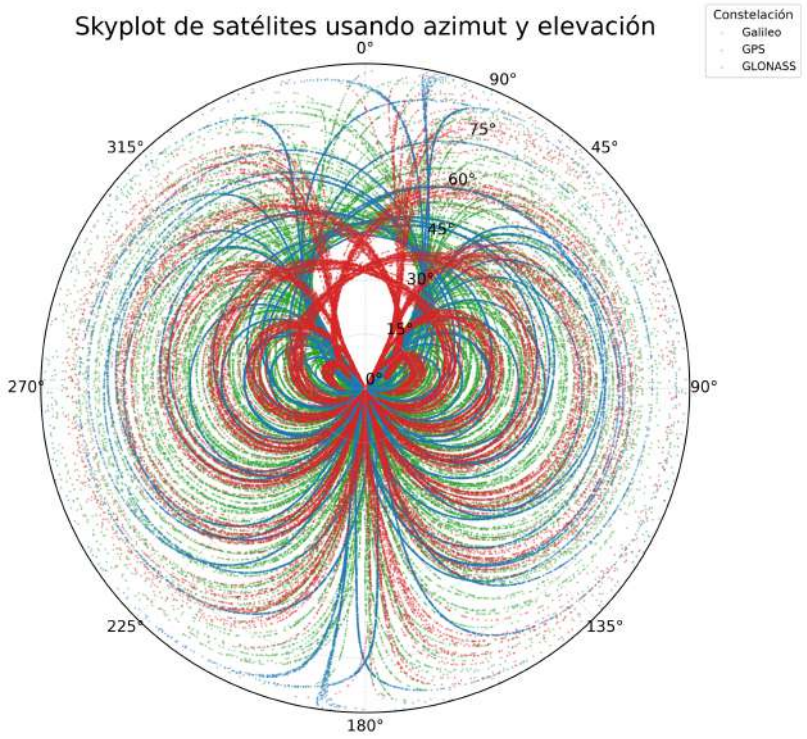
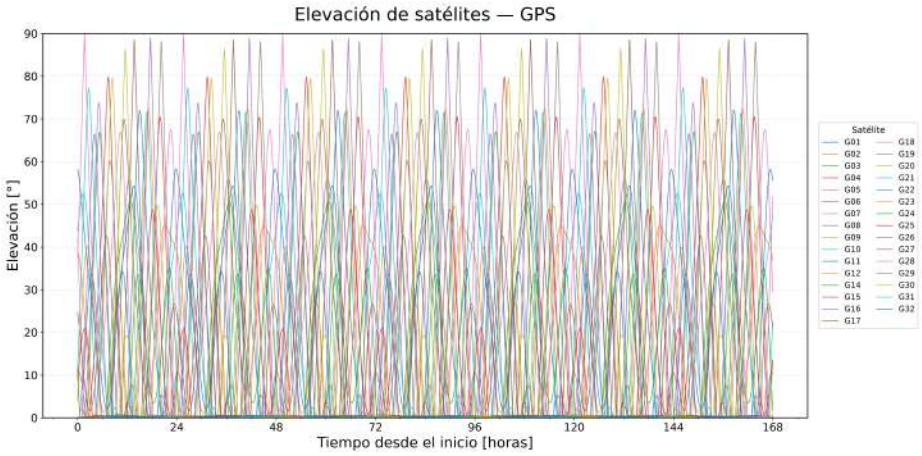
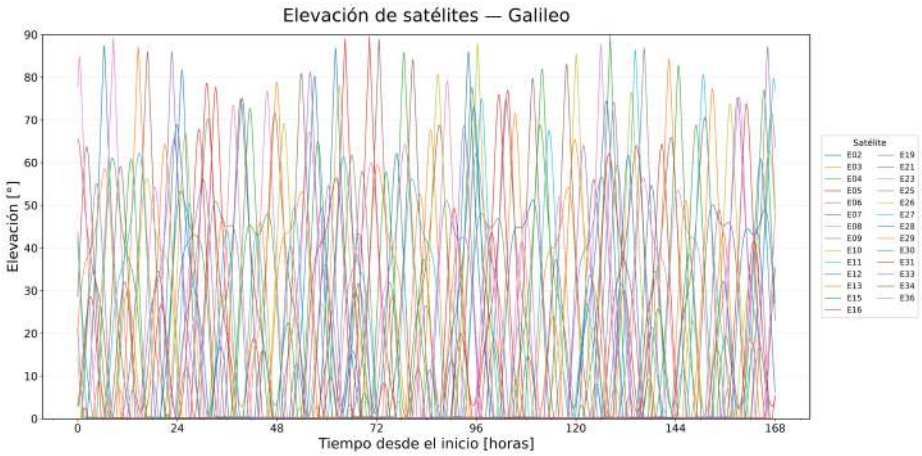


Figura 4.2: Gráfica de cielo de los satélites observados durante los siete días analizados con **TEQC**.

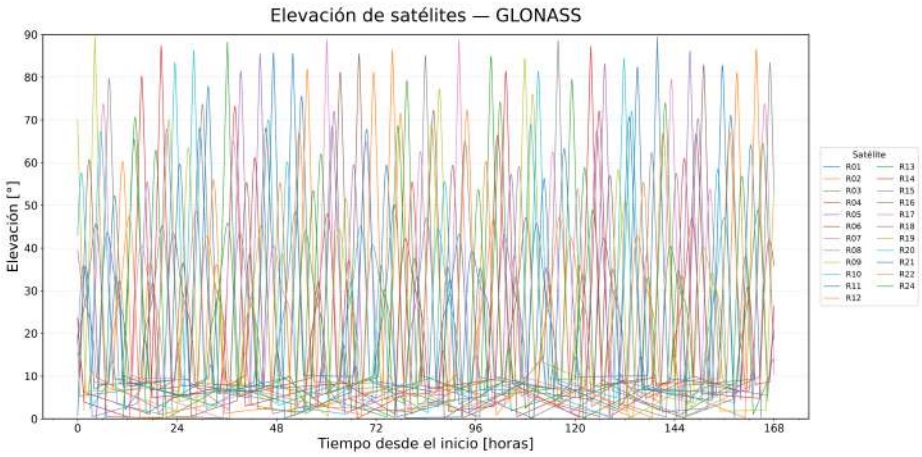
De manera complementaria, en la Figura 4.3 se presentan las series de tiempo de elevación separadas por constelación. Esta separación permite revisar si la disponibilidad geométrica es homogénea entre GPS, Galileo y GLONASS, o si alguna constelación presenta menor continuidad durante el periodo analizado.



(a) GPS.



(b) Galileo.



(c) GLONASS.

Figura 4.3: Series de tiempo de elevación de los satélites observados por constelación.

4.1.2. Combinación libre de ionosfera

TEQC calcula combinaciones asociadas al comportamiento ionosférico a partir de las frecuencias disponibles en los archivos RINEX. En la Figura 4.4 se muestra el mapa tiempo-satélite de la combinación libre de ionosfera para las frecuencias L1 y L2. Esta gráfica permite observar la evolución temporal de la combinación para los satélites disponibles durante el periodo de análisis.

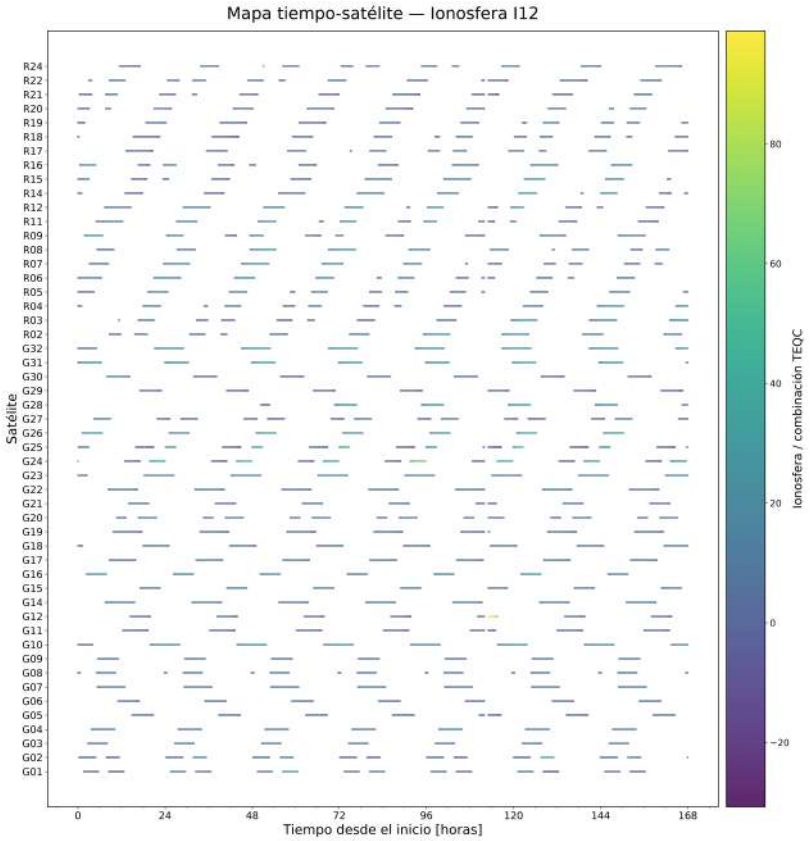
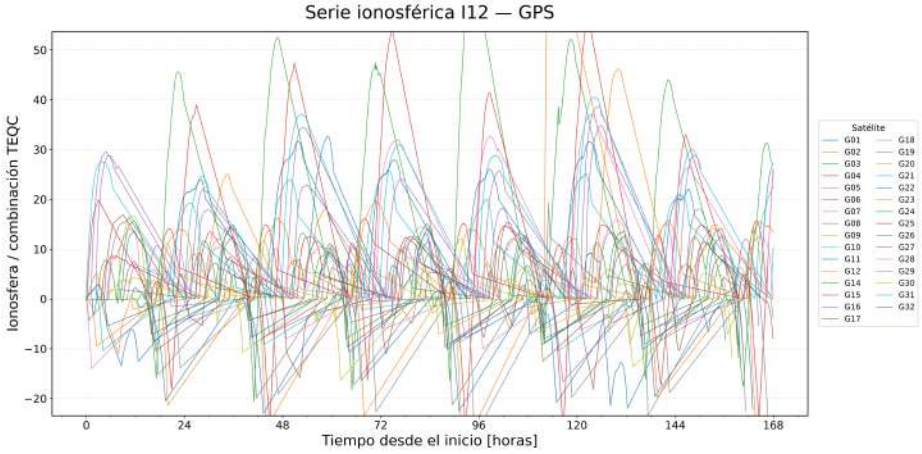
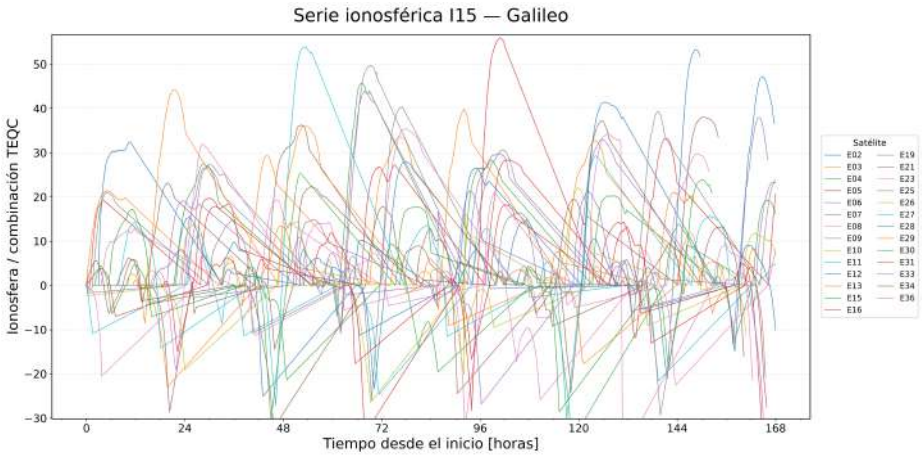


Figura 4.4: Mapa tiempo-satélite de la combinación libre de ionosfera para las frecuencias L1 y L2.

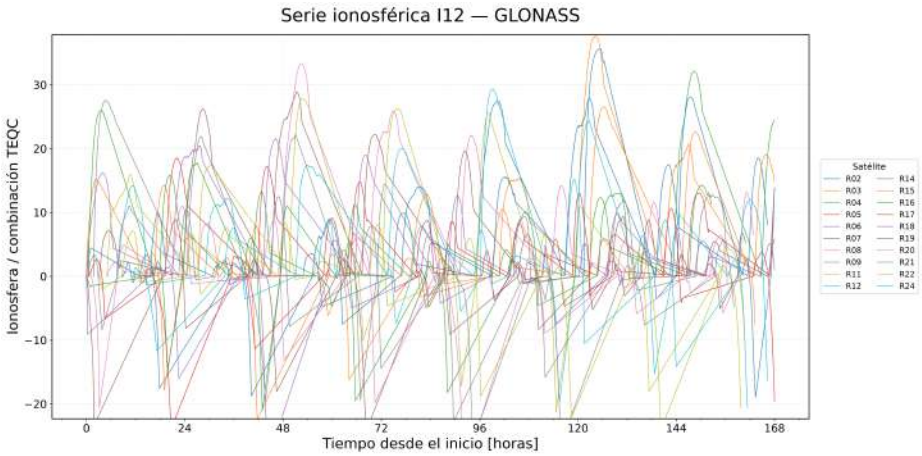
En la Figura 4.5 se muestran las series de tiempo de la combinación libre de ionosfera por constelación. Para GPS y GLONASS se utilizó la combinación entre L1 y L2, mientras que para Galileo se empleó la combinación entre L1 y L5. Estas series permiten identificar variaciones asociadas con la geometría de observación y con los periodos en los que los satélites se encuentran a baja elevación.



(a) GPS.



(b) Galileo.



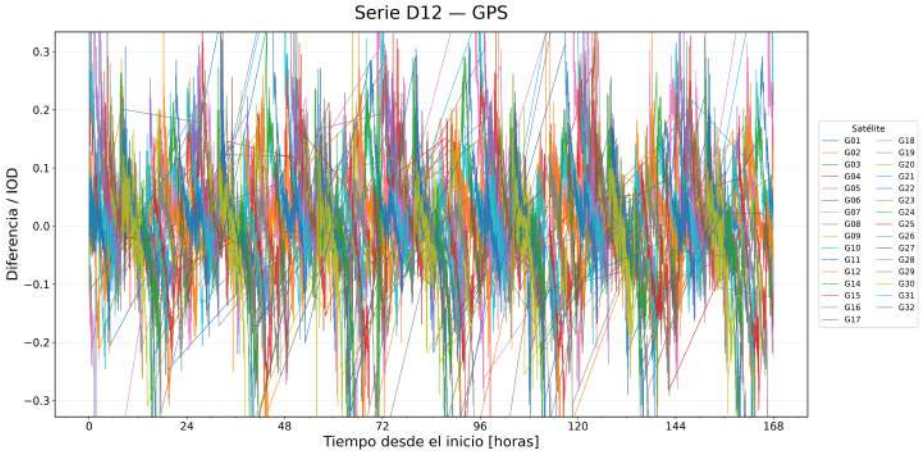
(c) GLONASS.

Figura 4.5: Series de tiempo de la combinación libre de ionosfera para los satélites observados por constelación.

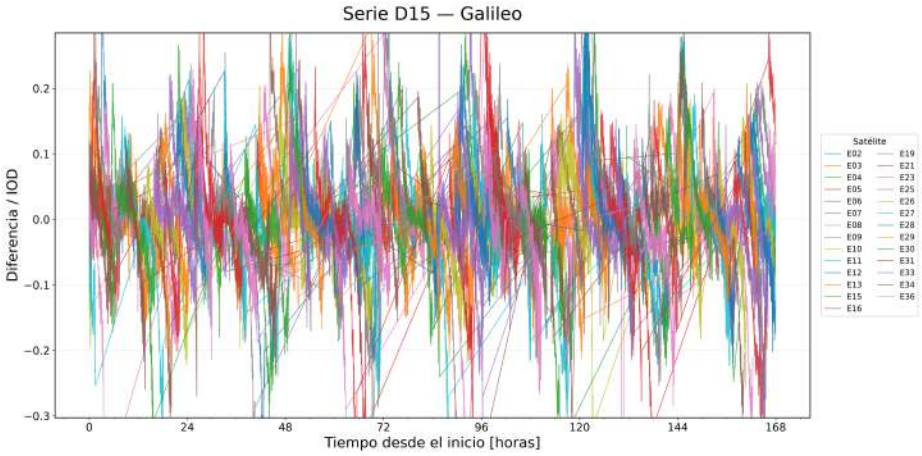
4.1.3. Variación temporal de la combinación libre de ionosfera

Además de la combinación libre de ionosfera, **TEQC** permite analizar su variación temporal. Este indicador es útil porque cambios abruptos pueden señalar discontinuidades en las observaciones de fase, variaciones ionosféricas rápidas, pérdida de seguimiento o presencia de valores atípicos. En condiciones normales, la variación temporal de esta combinación debe presentar un comportamiento relativamente suave, especialmente para observaciones continuas y sin saltos de ciclo.

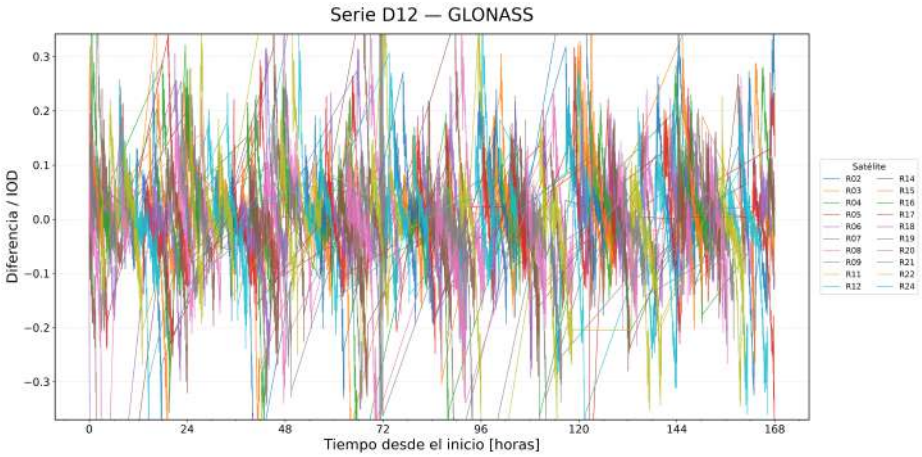
En la Figura 4.6 se muestran las series de tiempo de la variación de la combinación libre de ionosfera para las constelaciones GPS, Galileo y GLONASS. Los picos o discontinuidades presentes en estas series pueden utilizarse como indicadores preliminares de eventos que requieren revisión más detallada, especialmente cuando coinciden con baja elevación, disminución de SNR o incrementos en los indicadores de multicamino.



(a) GPS.



(b) Galileo.



(c) GLONASS.

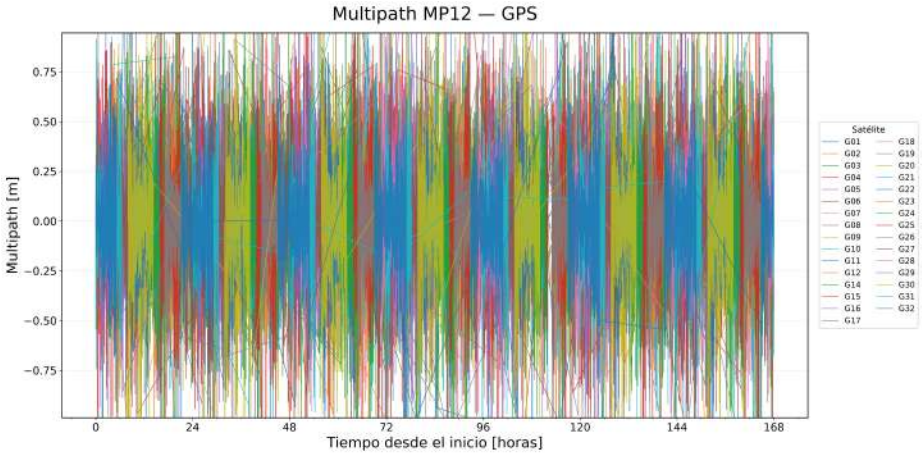
Figura 4.6: Variación temporal de la combinación libre de ionosfera para los satélites observados por constelación.

4.1.4. Indicadores de multicamino

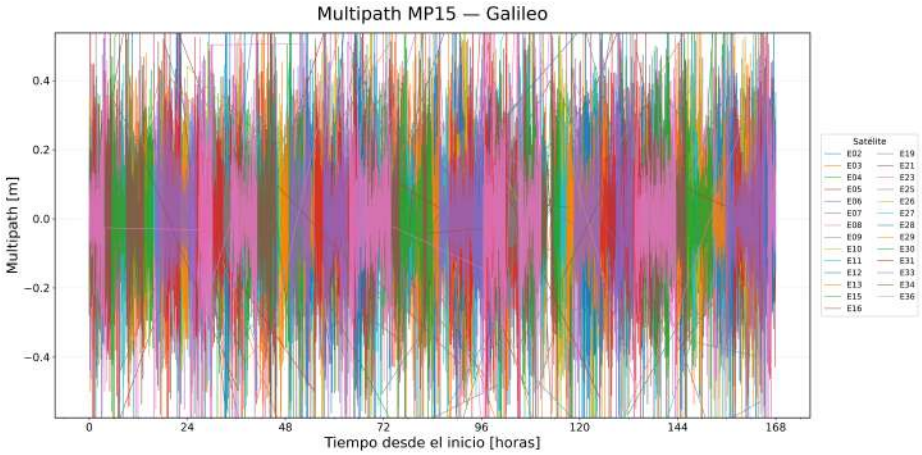
Los indicadores de multicamino calculados por **TEQC** permiten evaluar la posible presencia de señales reflejadas en el entorno de la antena. En este trabajo se analizaron las combinaciones asociadas a *MP1* y *MP2*, así como sus equivalentes según las frecuencias disponibles para cada constelación. Estos indicadores son relevantes porque el multicamino puede degradar tanto las observaciones de pseudorango como las de fase portadora.

En la Figura 4.7 se muestran las series de tiempo de los indicadores de multicamino

por constelación. El análisis temporal de estas series permite identificar satélites o intervalos con mayores niveles de dispersión, así como posibles patrones relacionados con trayectorias satelitales repetitivas y reflexiones locales cercanas a la antena.

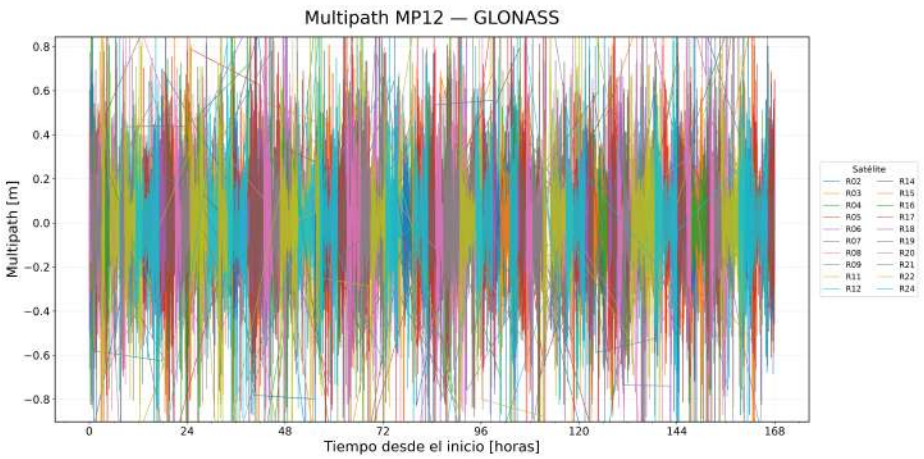


(a) GPS.



(b) Galileo.

Figura 4.7: Series de tiempo de los indicadores de multicamino para las constelaciones GPS, GLONASS y Galileo.



(c) GLONASS.

Figura 4.7: Series de tiempo de los indicadores de multicamino para las constelaciones GPS, GLONASS y Galileo.

4.1.5. Relación señal-ruido

La relación señal-ruido, o *SNR*, es un indicador directo de la intensidad relativa de la señal recibida respecto al ruido. En los archivos RINEX 2.11 procesados con **TEQC**, los valores de SNR aparecen en una escala de 2 a 9. Esta escala no corresponde directamente a valores en decibelios, sino a valores escalados almacenados en el archivo; sin embargo, conserva la relación proporcional entre señales débiles y fuertes. Por lo tanto, valores altos indican una mejor calidad relativa de recepción.

En la Figura 4.8 se muestran los valores de SNR para la frecuencia L1 de los satélites GPS durante las 168 horas analizadas. Esta gráfica permite identificar variaciones temporales en la intensidad de la señal y posibles reducciones asociadas con baja elevación, obstrucciones, atenuación, interferencia o efectos locales en el entorno de la antena.

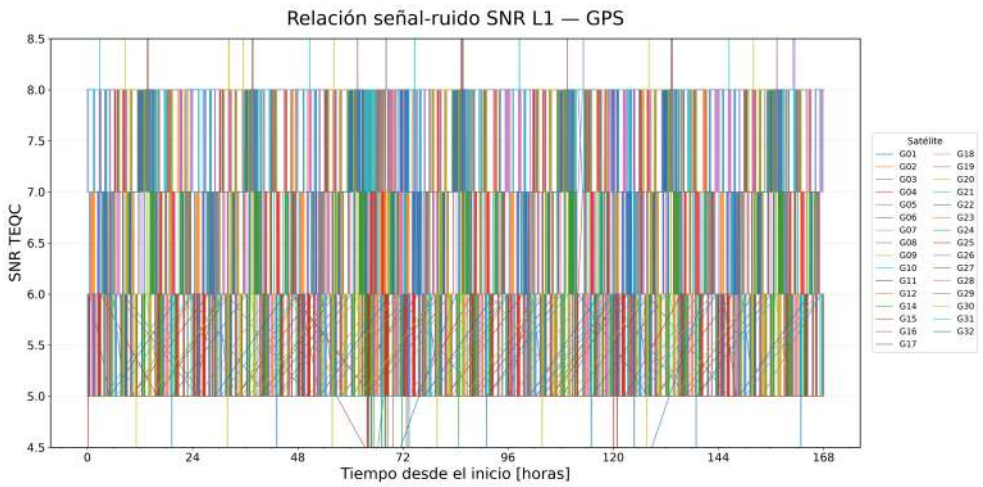


Figura 4.8: Serie de tiempo de los valores de SNR en la frecuencia L1 para los satélites de la constelación GPS.

4.1.6. Disponibilidad y continuidad de la estación

En el control de calidad realizado con **TEQC** se obtuvo un total de 949 007 observaciones esperadas, de las cuales 893 563 fueron registradas. Esto corresponde a una completitud aproximada de 94.16 %, calculada mediante:

$$\frac{893\,563}{949\,007} \times 100 = 94.16\,\%. \tag{4.1}$$

Este porcentaje representa la relación entre las observaciones disponibles en el archivo RINEX y las que se esperaría observar de acuerdo con la geometría satelital, el intervalo de muestreo y la máscara de elevación utilizada. La diferencia entre ambos valores corresponde a 55 444 observaciones no registradas, las cuales pueden estar asociadas con pérdidas de señal, obstrucciones, baja relación señal-ruido, interrupciones del receptor, problemas de almacenamiento o inconsistencias durante la adquisición de datos.

El monitoreo de la disponibilidad es importante en una estación CORS porque permite evaluar la continuidad de las observaciones GNSS y detectar posibles fallas operativas. Un porcentaje bajo de observaciones registradas puede comprometer la confiabilidad de los productos derivados, como archivos RINEX diarios, soluciones de

posicionamiento preciso, correcciones diferenciales o análisis de integridad.

4.1.7. Detección de saltos de ciclo

Los saltos de ciclo son discontinuidades en las observaciones de fase portadora que ocurren cuando el receptor pierde temporalmente el seguimiento continuo de una señal satelital. En aplicaciones de posicionamiento preciso, estos eventos son relevantes porque pueden afectar la estimación de coordenadas, la resolución de ambigüedades y la confiabilidad de los productos derivados de la estación.

En el control de calidad realizado con **TEQC**, los saltos de ciclo se identifican mediante indicadores asociados a discontinuidades en las observaciones de fase, así como mediante eventos relacionados con la variación temporal de la combinación ionosférica y el multicamino. En el reporte generado, **TEQC** utiliza como criterio de detección un límite asociado al indicador *IOD*, expresado como:

$$\text{IOD} > 400.0 \text{ cm/min.} \tag{4.2}$$

Este criterio indica que una variación ionosférica temporal superior a 400 cm/min puede considerarse como indicio de un posible salto de ciclo. El reporte separa los eventos detectados en dos grupos: aquellos ocurridos por debajo de la máscara de elevación de 10°, o con elevación desconocida, y aquellos ocurridos por encima de 10°. Esta separación es importante porque las observaciones de baja elevación suelen estar más afectadas por multicamino, ruido, obstrucciones y efectos atmosféricos.

Para el periodo analizado, correspondiente a una ventana de siete días, **TEQC** reportó los valores mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resumen de eventos asociados a saltos de ciclo reportados por **TEQC**.

Indicador	**Valor**
Saltos IOD $< 10°$ o elevación desconocida	98
Saltos IOD $> 10°$	24
Saltos IOD o MP $< 10°$ o elevación desconocida	99
Saltos IOD o MP $> 10°$	67
Observaciones completas $> 10°$	893 563
Observaciones por salto, `o/slps`	13 337

De acuerdo con estos resultados, el número de eventos IOD por encima de la máscara de elevación de 10° fue de 24. Al considerar conjuntamente los eventos detectados mediante IOD o multicamino, el número total de eventos por encima de 10° fue de 67. Este último valor es utilizado por **TEQC** para calcular el indicador `o/slps`, que representa el número promedio de observaciones completas por cada evento reportado:

$$\frac{893\,563}{67} \approx 13\,337. \tag{4.3}$$

Por lo tanto, durante el intervalo de análisis se presentó, en promedio, un evento asociado a salto de ciclo o multicamino por cada 13 337 observaciones completas por encima de 10° de elevación. Un valor alto de `o/slps` indica una mejor continuidad de las observaciones de fase, mientras que un valor bajo puede asociarse con pérdida frecuente de seguimiento, obstrucciones, baja relación señal-ruido, interferencia, multicamino significativo o problemas en el receptor.

En términos generales, los resultados muestran que la estación presentó una continuidad aceptable en las observaciones de fase durante el periodo evaluado. Aunque se detectaron eventos asociados a saltos de ciclo, la relación entre observaciones completas y eventos reportados sugiere que estos no ocurrieron de forma excesivamente frecuente respecto al volumen total de datos disponibles. No obstante, para un diagnóstico más detallado conviene revisar la distribución de estos eventos por satélite, constelación e intervalo horario.

4.2. Control de calidad con G-Nut/Anubis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con **G-Nut/Anubis**. Este procesamiento complementa el análisis realizado con **TEQC**, ya que permite trabajar con archivos RINEX 3.04 y separar los indicadores de calidad por constelación, señal y satélite. Además, sus salidas estructuradas facilitaron la extracción de métricas y la generación de gráficas mediante Python.

4.2.1. Configuración del procesamiento

El procesamiento con **G-Nut/Anubis** se aplicó a los archivos RINEX 3.04 correspondientes al intervalo comprendido entre los días julianos 140 y 146 de 2026. Para cada día se preparó un archivo de observación y un archivo de navegación. Los archivos de observación fueron nombrados con el identificador de estación `FICU` y la terminación `MO.rnx`, mientras que los archivos de navegación fueron nombrados con la terminación `MN.rnx`.

El archivo de configuración de **G-Nut/Anubis** fue generado automáticamente para cada día mediante un archivo XML. En dicho archivo se definieron los archivos de entrada, las constelaciones consideradas, el intervalo de análisis, la máscara de elevación y las salidas requeridas. El procesamiento se configuró con un intervalo de un segundo y un nivel alto de detalle, con el fin de conservar la mayor resolución temporal posible en las métricas generadas. Una configuración representativa fue:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<!DOCTYPE config>
<config>
<gen> <int>1</int> <rec></rec> <sys>GPS GLO GAL BDS QZS SBS</sys> </gen>
<qc sec_sum="9" sec_hdr="9" sec_obs="9" sec_est="9" sec_gap="9" sec_bnd="9"
    sec_pre="9" sec_ele="9" sec_mpx="9" sec_snr="9" sec_sat="9" int_stp="1"
    int_gap="600" int_pcs="1800" mpx_nep="30" mpx_lim="3.0" pos_kin="false"
    pos_int="1" pos_cut="5" ele_cut="10" col_sat="64" sat_rec="true"
    use_health="ALL" use_qcmode="FULL" ref_sig="0" max_vpe="10" max_hpe="10"
```

```
    max_dop="30" />
<inp> <rinexn>FICUDDD_MN.rnx</rinexn> <rinexo>FICUDDD_MO.rnx</rinexo> </inp>
<out append="true" verb="9"> <log>anubis.log</log> <xml>out_xml.xml</xml> <
    xtr>out_xtr.xtr</xtr> </out>
</config>
```

El parámetro `int_stp=1` indica que las métricas de control de calidad se generan con resolución de un segundo. El parámetro `pos_int=1` establece también un intervalo de un segundo para los indicadores asociados al posicionamiento. La máscara de elevación se definió mediante `ele_cut=10`, por lo que las observaciones por debajo de 10° se tratan de forma diferenciada dentro del control de calidad. Asimismo, el uso de `verb=9` permitió generar salidas detalladas para el diagnóstico del procesamiento.

Los productos principales generados por **G-Nut/Anubis** fueron el archivo de registro `anubis.log`, el archivo XML de salida `out_xml.xml` y el archivo extendido de control de calidad `out_xtr.xtr`. Este último fue utilizado como fuente principal para extraer las métricas de análisis. Los resultados de los siete días fueron integrados en una carpeta general para analizar de forma conjunta indicadores de relación señal-ruido, multicamino, elevación, azimut, gráfica de cielo, número de satélites, DOP, variación de coordenadas y salud satelital.

4.2.2. Número de satélites y geometría de posicionamiento

En esta subsección se analiza la variación temporal del número de satélites disponibles y utilizados durante el procesamiento con **G-Nut/Anubis**. Este indicador permite evaluar la continuidad de las observaciones y la estabilidad de la geometría satelital durante el periodo de análisis. Un número elevado y estable de satélites favorece una mejor estimación de la posición, mientras que disminuciones abruptas pueden asociarse con pérdida de seguimiento, obstrucciones, baja elevación satelital o problemas en la recepción de la señal.

Para complementar este análisis se revisan los valores DOP, los cuales describen el efecto de la geometría satelital sobre la precisión del posicionamiento. Valores bajos

de DOP indican una geometría favorable, mientras que valores altos sugieren una configuración satelital menos adecuada.

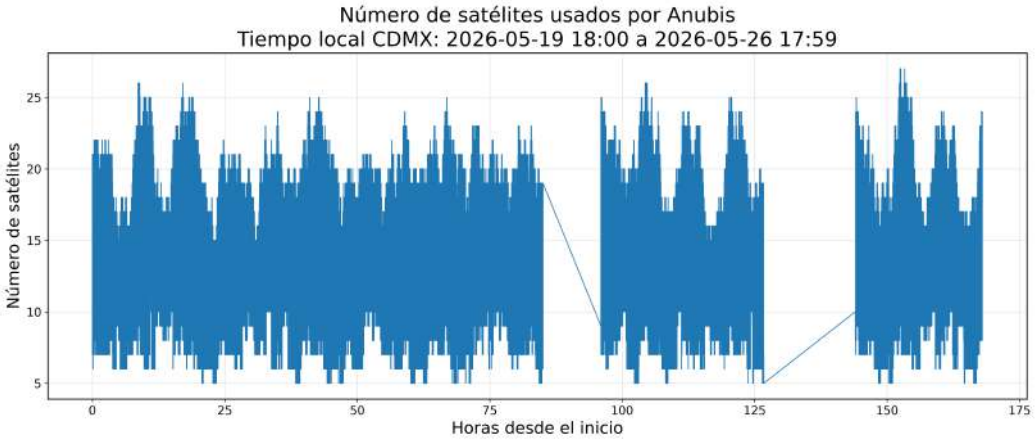


Figura 4.9: Número de satélites observados durante el periodo de análisis obtenido con **G-Nut/Anubis**.



Figura 4.10: Variación temporal de los valores DOP obtenidos durante el procesamiento con **G-Nut/Anubis**.

4.2.3. Estabilidad de la solución de posición

La estabilidad de la solución de posición permite analizar la variación temporal de las coordenadas estimadas durante el procesamiento. Aunque el objetivo principal de **G-Nut/Anubis** no es generar una solución final de posicionamiento preciso, los indicadores asociados a la posición permiten identificar cambios, dispersión o comportamientos anómalos en las coordenadas estimadas.

En esta subsección se revisan las variaciones relativas de las coordenadas cartesianas y de la altura. Estas gráficas permiten observar si la solución mantiene un comportamiento estable durante el intervalo procesado o si existen épocas con desplazamientos aparentes relacionados con baja calidad de observación, geometría deficiente, pérdida de satélites o errores no modelados.

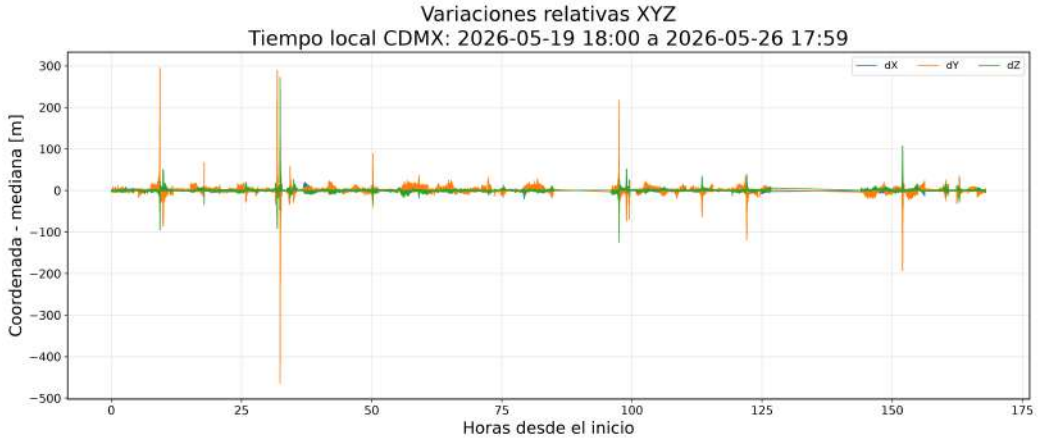


Figura 4.11: Variación relativa de las componentes cartesianas de posición obtenidas con **G-Nut/Anubis**.

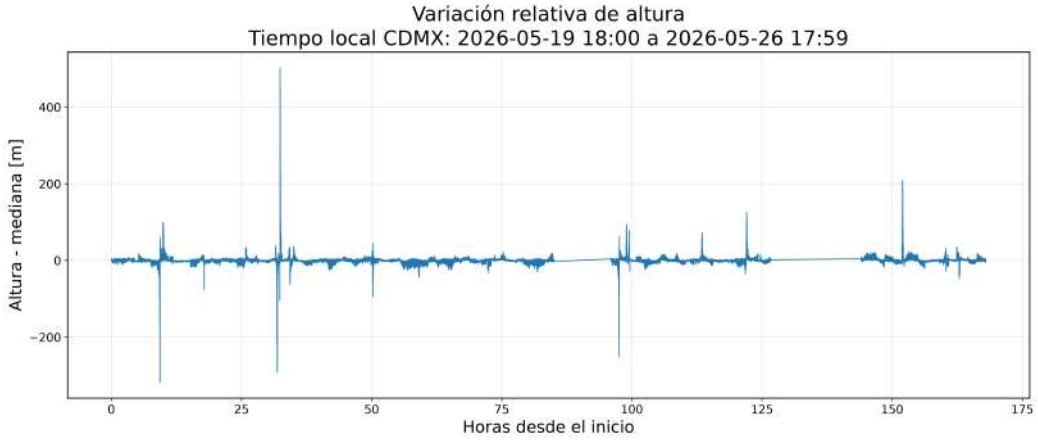


Figura 4.12: Variación relativa de la altura durante el periodo de análisis.

4.2.4. Distribución espacial de los satélites

El análisis de elevación y azimut permite estudiar la distribución espacial de los satélites observados por la estación. La elevación es importante porque las señales

provenientes de satélites cercanos al horizonte suelen presentar mayor trayectoria atmosférica, menor relación señal-ruido y mayor susceptibilidad al multicamino. Por su parte, el azimut permite identificar direcciones donde pueden concentrarse obstrucciones o reflexiones locales.

La gráfica de cielo permite representar de forma conjunta la elevación y el azimut de los satélites observados. Este tipo de representación es útil para analizar la cobertura satelital alrededor de la antena y detectar posibles zonas con ausencia de observaciones o concentración de trayectorias de baja elevación.

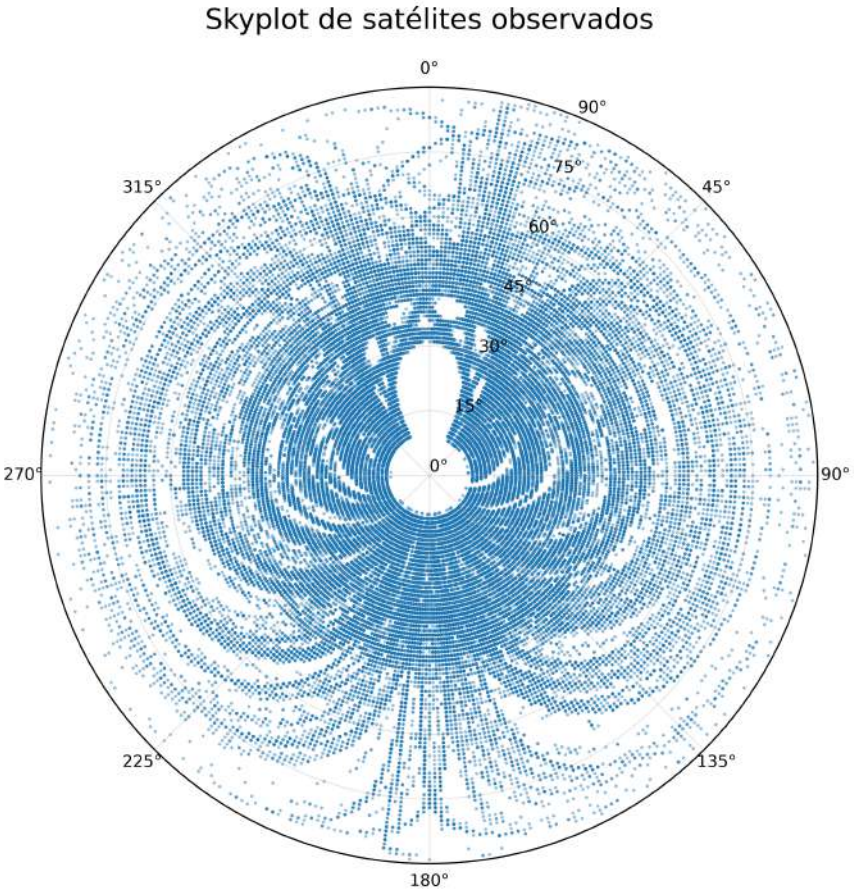


Figura 4.13: Gráfica de cielo general obtenida a partir de los resultados de **G-Nut/Anubis**.

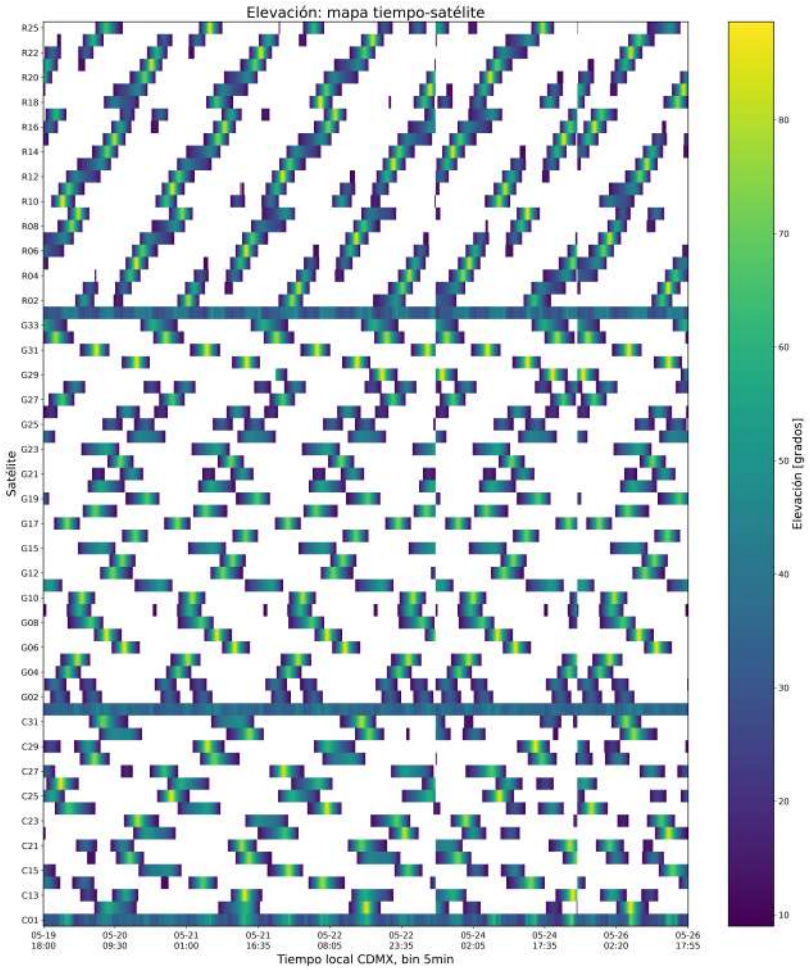


Figura 4.14: Mapa tiempo-satélite de elevación durante el periodo analizado.

4.2.5. Relación señal-ruido por constelación y señal

La relación señal-ruido se analizó por constelación, señal y satélite. Esta separación permite identificar si la degradación de la calidad afecta de manera general a todas las señales o si se concentra en frecuencias, satélites o constelaciones específicas. La comparación por señal es especialmente útil en receptores multi-GNSS, ya que cada frecuencia puede responder de forma distinta ante efectos atmosféricos, ruido o condiciones locales de recepción.

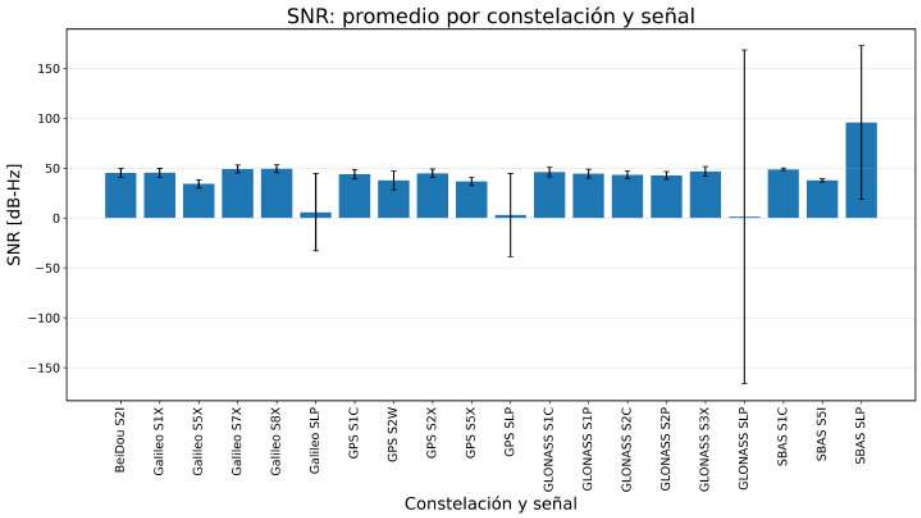


Figura 4.15: Promedio de SNR por señal y constelación obtenido con **G-Nut/Anubis**.

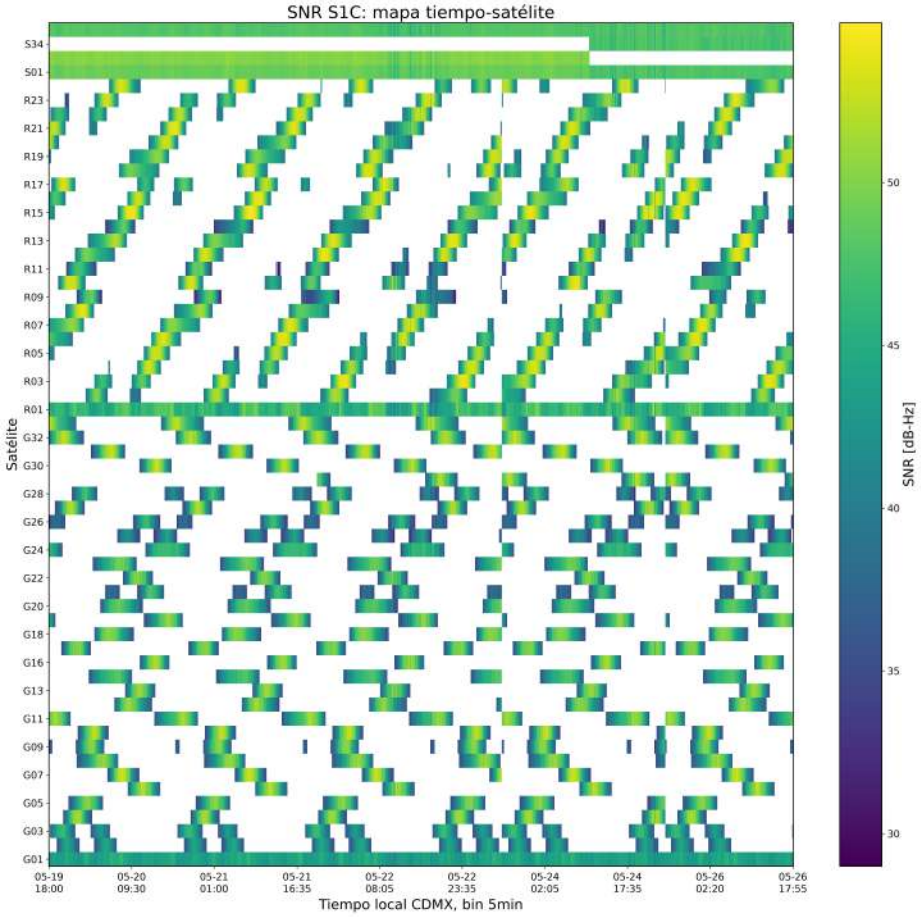


Figura 4.16: Mapa tiempo-satélite de SNR para la señal S1C.

4.2.6. Análisis de multicamino por constelación y señal

El análisis de multicamino obtenido con **G-Nut/Anubis** permitió evaluar la magnitud de este efecto por constelación, señal y satélite. Valores elevados o patrones repetitivos pueden indicar la presencia de reflectores cercanos a la estación o condiciones geométricas específicas que favorecen la propagación por trayectorias indirectas. Por esta razón, el estudio del multicamino es fundamental para caracterizar la calidad del sitio donde se encuentra instalada la antena GNSS.

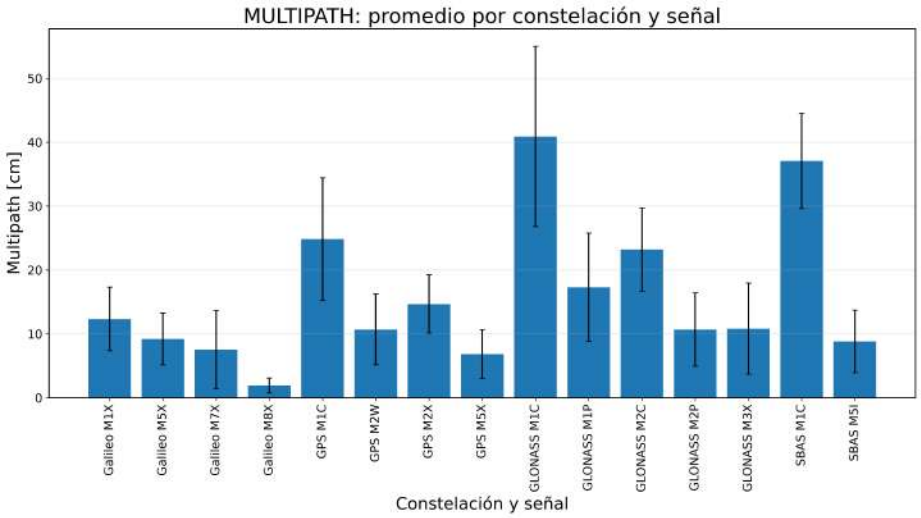


Figura 4.17: Promedio de multicamino por señal y constelación obtenido con **G-Nut/Anubis**.

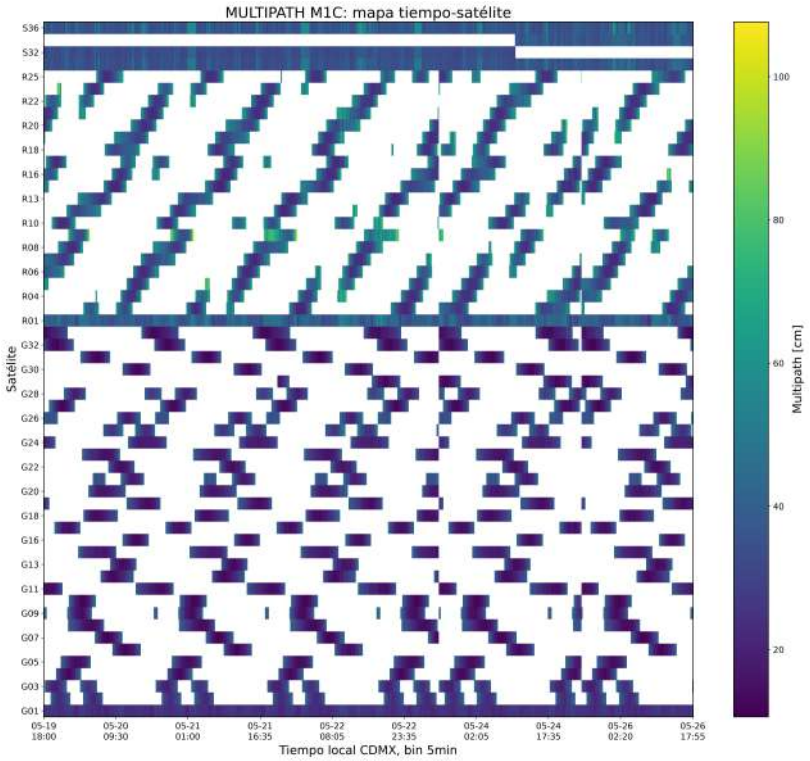


Figura 4.18: Mapa tiempo-satélite del indicador de multicamino para la señal M1C.

4.2.7. Salud satelital y redundancia de observaciones

La salud satelital y la redundancia de observaciones son indicadores que permiten verificar la confiabilidad de los satélites utilizados durante el procesamiento. La información de salud permite identificar satélites marcados como no saludables o con posibles problemas en los mensajes de navegación. Por otro lado, la redundancia de observaciones permite evaluar la disponibilidad relativa de información para cada satélite durante el periodo analizado.

Estos indicadores son relevantes porque una estación CORS debe mantener un seguimiento estable de múltiples satélites y constelaciones. La presencia de satélites no saludables, observaciones inconsistentes o baja redundancia puede afectar la calidad del posicionamiento y debe considerarse dentro del diagnóstico general de la estación.

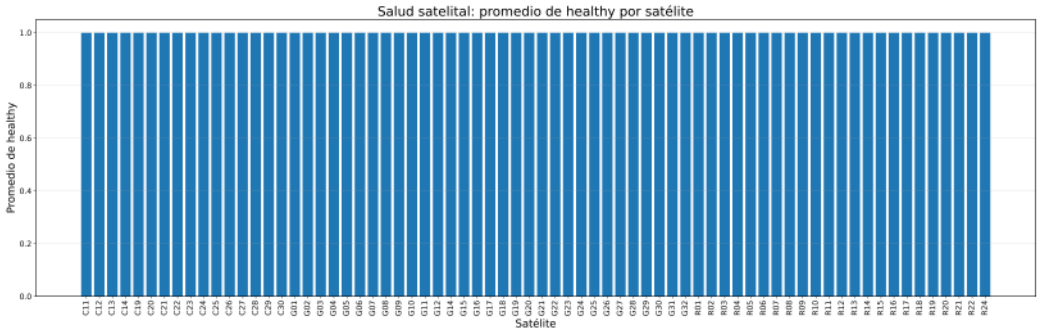


Figura 4.19: Indicador promedio de salud satelital por satélite obtenido con **G-Nut/Anubis**.

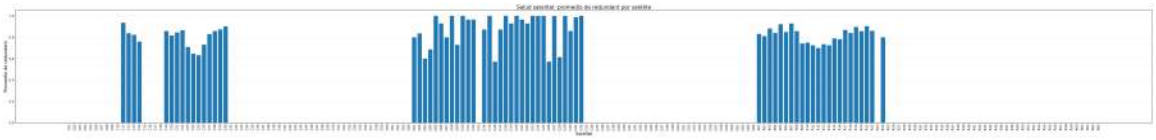


Figura 4.20: Indicador promedio de redundancia satelital por satélite obtenido con **G-Nut/Anubis**.

4.2.8. Síntesis del control de calidad con G-Nut/Anubis

Los resultados obtenidos con **G-Nut/Anubis** complementan el análisis realizado previamente con **TEQC**, ya que permiten estudiar los indicadores de calidad en archivos RINEX 3.04 y separar la información por constelación, señal y satélite. A partir de los productos generados se analizaron parámetros relacionados con número de satélites, geometría de posicionamiento, estabilidad de coordenadas, relación señal-ruido, multicamino, elevación, azimut, gráfica de cielo y salud satelital.

En conjunto, estos indicadores permiten caracterizar de manera integral el comportamiento de la estación durante el periodo de análisis. La combinación de métricas temporales, estadísticas y espaciales facilita la identificación de épocas o señales con comportamiento anómalo, así como la evaluación de posibles efectos locales en el entorno de la antena.

4.3. Procesamiento PPP con GIPSY/GipsyX

El análisis de calidad de las observaciones GNSS se complementó mediante un procesamiento PPP utilizando **GIPSY/GipsyX**. A diferencia de los análisis realizados con **TEQC** y **G-Nut/Anubis**, en los cuales se procesaron siete días consecutivos de datos, el procesamiento con **GIPSY/GipsyX** se aplicó únicamente a un día completo de observaciones de la estación CORS FICU. Esta decisión se tomó debido a la mayor demanda computacional del procesamiento PPP y a que, para fines descriptivos de la metodología, un día de datos resulta suficiente para mostrar el comportamiento de los residuales y de la solución de posición.

El procesamiento PPP se realizó manteniendo fijas las coordenadas de la estación. Esta estrategia permite que las diferencias entre las observaciones medidas y las observaciones calculadas se reflejen con mayor claridad en los residuales, evitando que los errores presentes en los datos sean absorbidos por una estimación libre de la posición. En este contexto, los residuales de pseudorango y fase portadora se utilizan como indicadores directos de la calidad de las observaciones.

Los archivos de residuales generados por **GIPSY/GipsyX** incluyen observaciones de combinación libre de ionosfera. En particular, los residuales identificados como `IonoFreeC_1W_2W` corresponden a residuales de código o pseudorango, mientras que los identificados como `IonoFreeL_1W_2W` corresponden a residuales de fase portadora. A partir de estos productos se generaron gráficas en el dominio del tiempo, histogramas y relaciones con la elevación satelital.

4.3.1. Residuales de pseudorango obtenidos con GIPSY/GipsyX

Los residuales de pseudorango representan la diferencia entre la observación de código registrada por el receptor y la observación calculada mediante el modelo PPP, como se describió en el capítulo teórico mediante la ecuación (2.47). Debido a que el pseudorango es más sensible al ruido y al multicamino que la fase portadora, su análisis permite evaluar la calidad general de las observaciones de código.

En los archivos generados por **GIPSY/GipsyX**, estos residuales fueron identifi-

cados mediante el observable `IonoFreeC_1W_2W`. La Figura 4.21 muestra su evolución temporal durante el día procesado. Esta gráfica permite observar la dispersión de los residuales e identificar épocas con valores atípicos o incrementos sistemáticos.

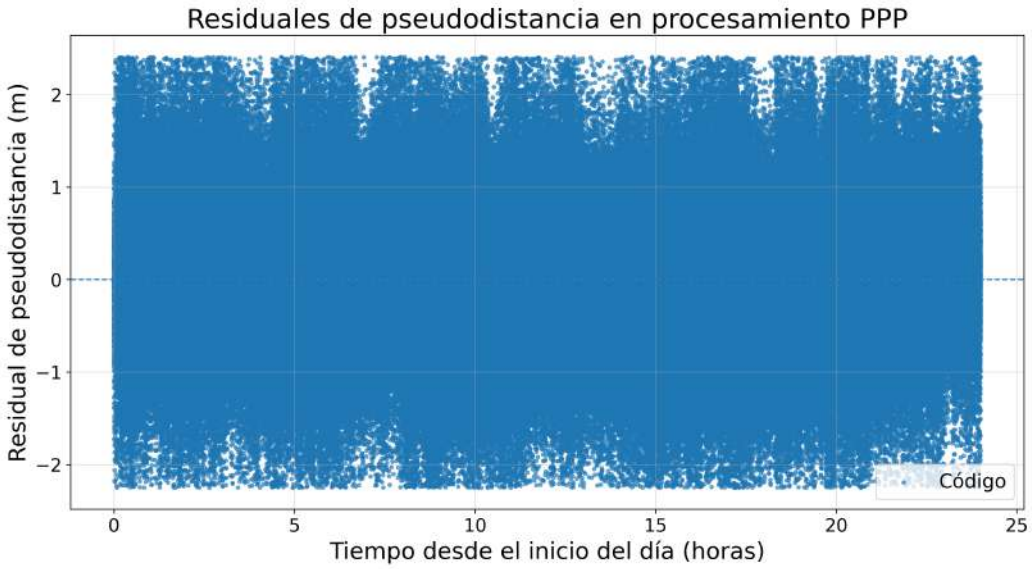


Figura 4.21: Residuales de pseudorango obtenidos mediante procesamiento PPP con coordenadas fijas.

La distribución estadística de los residuales de pseudorango se muestra en la Figura 4.22. El histograma permite evaluar si los residuales se concentran alrededor de cero o si presentan sesgos, colas largas o valores extremos. Este análisis complementa la revisión temporal, ya que permite identificar el comportamiento global de los residuales durante el día analizado.

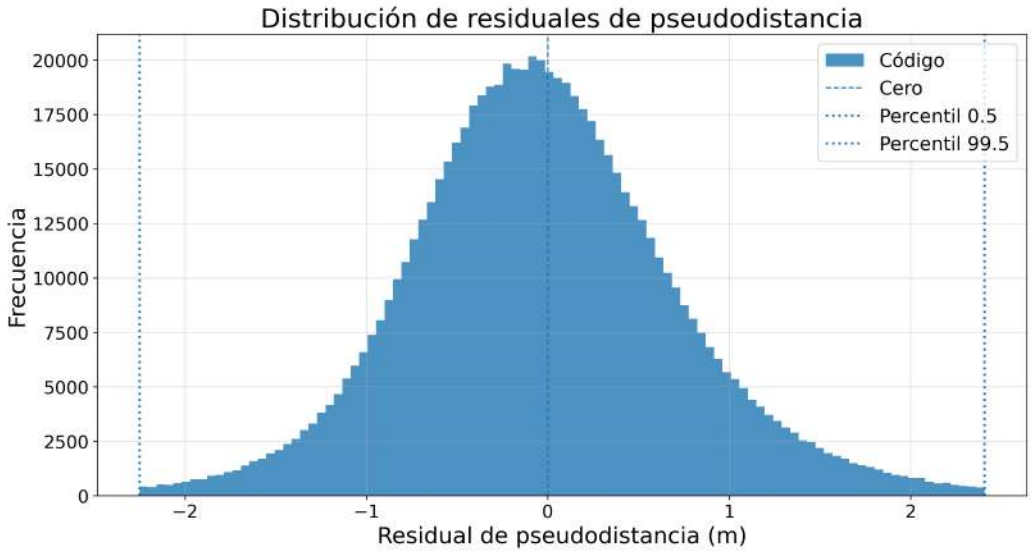


Figura 4.22: Distribución de los residuales de pseudorango obtenidos con **GIPSY/GipsyX**.

La Figura 4.23 muestra la relación entre los residuales de pseudorango y la elevación del satélite. Esta comparación permite verificar si las observaciones de baja elevación presentan mayor dispersión, lo cual puede estar asociado con una trayectoria atmosférica más larga, menor relación señal-ruido o mayor susceptibilidad al multicamino.

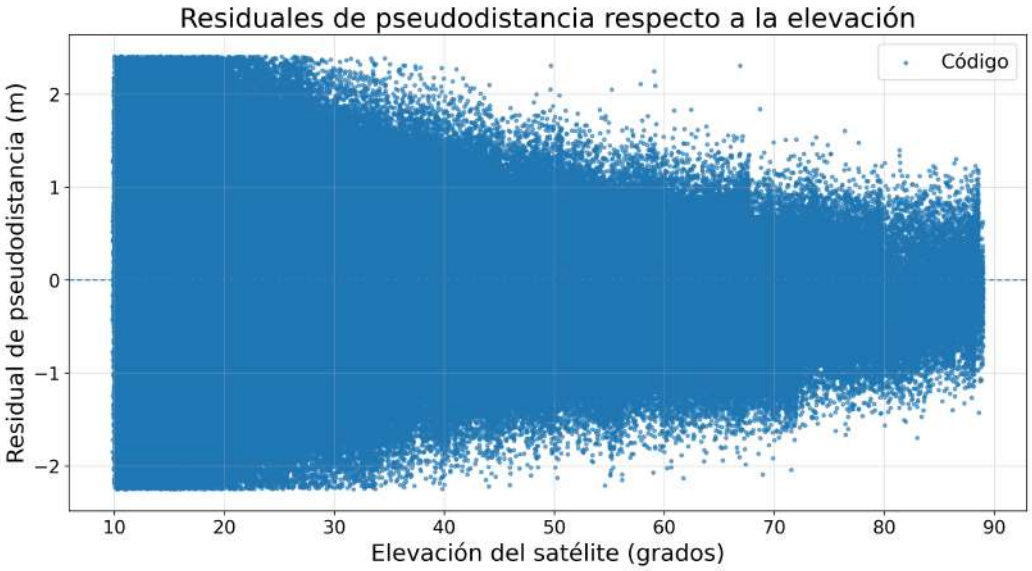


Figura 4.23: Residuales de pseudorango en función de la elevación satelital.

4.3.2. Residuales de fase portadora obtenidos con GIPSY/GipsyX

Los residuales de fase portadora representan la diferencia entre la observación de fase registrada por el receptor y la observación calculada mediante el modelo PPP, como se describió en la ecuación (2.49). Debido a que la fase portadora tiene menor ruido que el pseudorango, sus residuales suelen presentar magnitudes menores y permiten detectar con mayor sensibilidad discontinuidades, saltos de ciclo, pérdida de seguimiento o errores residuales del procesamiento.

En este trabajo, los residuales de fase se analizaron a partir del observable `IonoFreeL_1W_2W`, correspondiente a la combinación ionosféricamente libre de fase. La Figura 4.24 muestra estos residuales en el dominio del tiempo. Debido a su magnitud, se representan en milímetros para facilitar la interpretación visual.

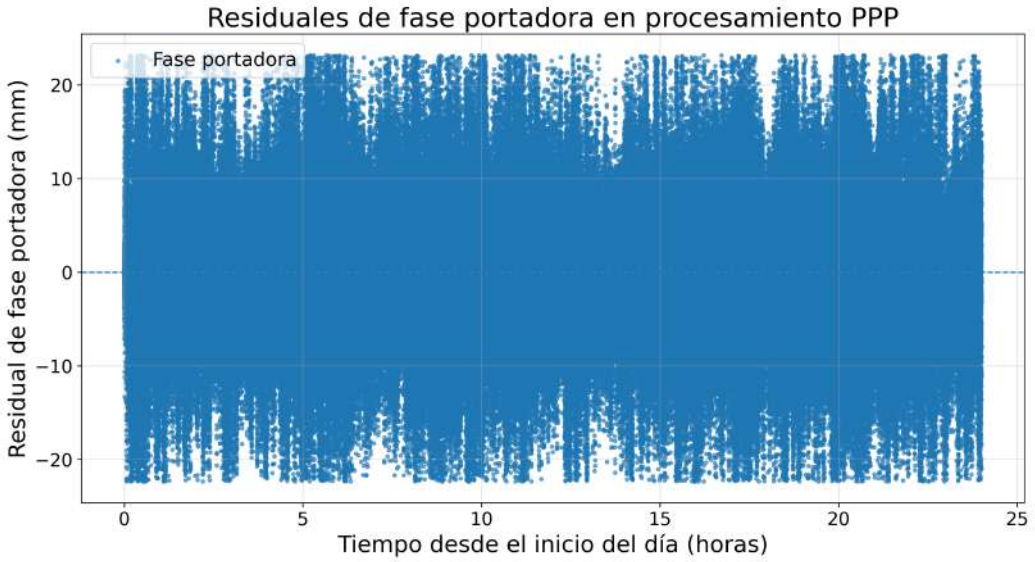


Figura 4.24: Residuales de fase portadora obtenidos mediante procesamiento PPP con coordenadas fijas.

La Figura 4.25 presenta la distribución de los residuales de fase portadora. Una distribución concentrada alrededor de cero indica consistencia interna del procesamiento, mientras que una distribución amplia o con colas pronunciadas puede asociarse con valores atípicos, discontinuidades o errores no modelados.

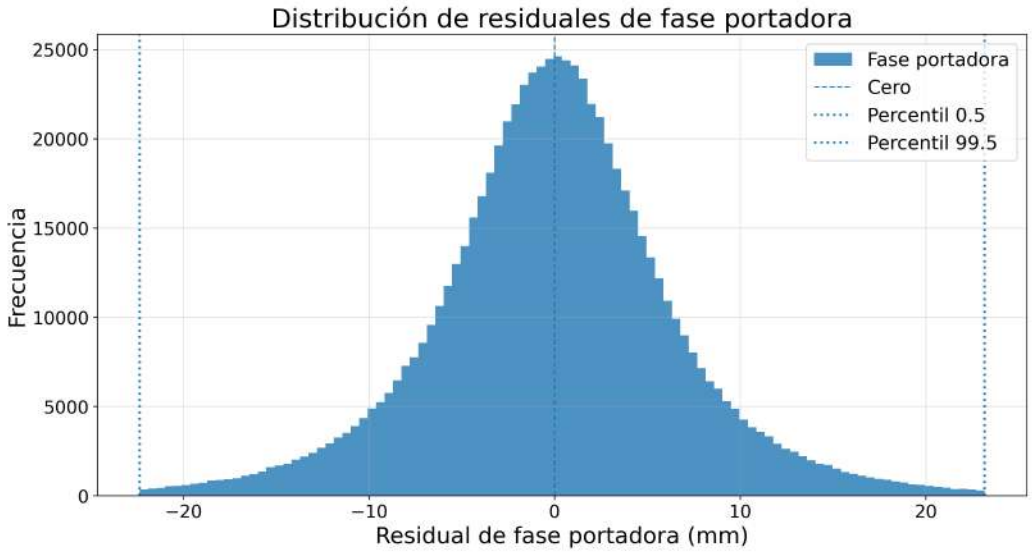


Figura 4.25: Distribución de los residuales de fase portadora obtenidos con **GIPSY/GipsyX**.

La Figura 4.26 muestra los residuales de fase portadora en función de la elevación satelital. Aunque la fase portadora es menos ruidosa que el pseudorango, también puede verse afectada por condiciones de baja elevación, multicamino y pérdida de seguimiento. Por ello, esta figura permite verificar si los residuales aumentan para satélites cercanos al horizonte o si existen patrones asociados con determinadas condiciones geométricas.

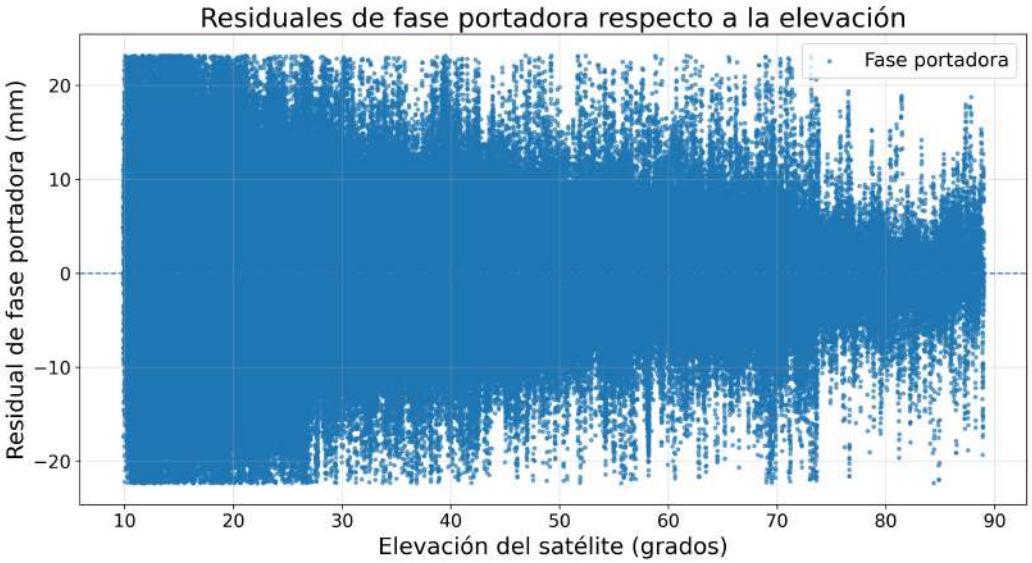


Figura 4.26: Residuales de fase portadora en función de la elevación satelital.

4.4. Detección de anomalías

Una vez calculados y analizados los indicadores de calidad obtenidos con **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX**, se aplicó el algoritmo de detección de anomalías descrito en el capítulo anterior. El objetivo de esta etapa fue identificar valores extremos dentro de las series temporales y de los resúmenes estadísticos generados durante el procesamiento de las observaciones GNSS de la estación CORS FICU.

La detección se realizó mediante umbrales empíricos basados en percentiles. Para indicadores cuyo deterioro se manifiesta mediante valores altos, como el multicamino o la magnitud de algunos residuales, se utilizó un criterio de cola superior basado en el percentil 99. Para indicadores en los que los valores bajos representan degradación de la calidad, como la elevación satelital, la relación señal-ruido o la redundancia de observaciones, se utilizó un criterio de cola inferior. Finalmente, para indicadores con valores firmados, como la combinación libre de ionosfera, su variación temporal y los residuales de pseudorango y fase portadora, se utilizó un criterio bilateral basado en los percentiles 0.5 y 99.5.

Es importante señalar que los valores detectados como anomalías corresponden a valores extremos desde el punto de vista estadístico. Por lo tanto, no necesariamente representan fallas físicas de la estación, sino épocas, satélites, señales o indicadores que se apartan del comportamiento dominante observado durante el periodo de análisis. Estos valores deben interpretarse junto con otros parámetros, como elevación, azimut, SNR, multicamino, disponibilidad de observaciones y residuales PPP.

La Tabla 4.2 resume los resultados obtenidos para los principales indicadores utilizados en esta tesis. En el caso de **TEQC**, la detección se aplicó sobre las series temporales generadas a partir de los archivos RINEX 2.11. Para **G-Nut/Anubis**, se consideraron los indicadores resumidos por señal, constelación o satélite. Finalmente, para **GIPSY/GipsyX**, la detección se aplicó directamente sobre los residuales de pseudorango y fase portadora obtenidos del archivo `finalResiduals.out`.

Fuente	Indicador	Criterio aplicado	Datos	Anomalías	%
TEQC	Elevación satelital	$x < P_1 = 0.533°$	1 188 867	11 881	0.999

Fuente	Indicador	Criterio aplicado	Datos	Anomalías	%
TEQC	Combinación libre de ionosfera $I12$	$x < P_{0.5} = -18.895$ o $x > P_{99.5} = 49.956$	578 136	5 781	1.000
TEQC	Combinación libre de ionosfera $I15$	$x < P_{0.5} = -31.473$ o $x > P_{99.5} = 54.150$	626 732	6 268	1.000
TEQC	Variación temporal de la combinación ionosférica $D12$	$x < P_{0.5} = -0.327$ o $x > P_{99.5} = 0.309$	578 136	5 709	0.987
TEQC	Variación temporal de la combinación ionosférica $D15$	$x < P_{0.5} = -0.717$ o $x > P_{99.5} = 0.725$	626 732	6 252	0.998
TEQC	Multicamino $M12$	$x > P_{99} = 0.740$	578 136	5 761	0.996
TEQC	Multicamino $M15$	$x > P_{99} = 0.734$	626 732	6 240	0.996
TEQC	Relación señal-ruido $SN1$	$x < P_1 = 5.000$	1 008 139	377	0.037
G-Nut/Anubis	Elevación media por satélite	$x < P_1 = 24.056°$	73	1	1.370
G-Nut/Anubis	Multicamino promedio por señal y satélite	$x > P_{99} = 41.753$	319	4	1.254
G-Nut/Anubis	SNR promedio por señal y constelación	$x < P_1 = 1.395$	20	1	5.000
G-Nut/Anubis	Salud satelital promedio	$x < P_1 = 1.000$	70	0	0.000
G-Nut/Anubis	Redundancia de observaciones	$x < P_1 = 140.000$	192	0	0.000
GIPSY/GipsyX	Residual de pseudorango	$x < P_{0.5} = -2.175$ m o $x > P_{99.5} = 2.495$ m	727 237	7 274	1.000
GIPSY/GipsyX	Residual de fase portadora	$x < P_{0.5} = -21.561$ mm o $x > P_{99.5} = 24.809$ mm	727 237	7 274	1.000

Tabla 4.2: Resumen de anomalías detectadas en los indicadores de calidad GNSS analizados.

A partir de la Tabla 4.2, se observa que los indicadores basados en criterios bilaterales presentan porcentajes cercanos al 1 %, lo cual es consistente con el uso de los percentiles 0.5 y 99.5. Este comportamiento se observa en la combinación libre de ionosfera, en su variación temporal y en los residuales obtenidos mediante **GIPSY/GipsyX**. En estos casos, las anomalías corresponden a observaciones ubicadas en las colas inferior y superior de la distribución.

En los indicadores de multicamino obtenidos con **TEQC**, los valores extremos se identificaron mediante un criterio de cola superior. Para $M12$ se detectaron 5 761 anomalías de un total de 578 136 datos, mientras que para $M15$ se detectaron 6 240 anomalías de un total de 626 732 datos. Estos valores representan aproximadamente el 1 % de las observaciones analizadas, lo cual corresponde al umbral definido por el percentil 99. Las épocas identificadas deben revisarse junto con la elevación satelital

y la SNR, ya que el multicamino suele incrementarse en señales de baja elevación o en trayectorias afectadas por reflexiones locales.

En el caso de la relación señal-ruido $SN1$ obtenida con **TEQC**, se detectaron 377 valores anómalos de un total de 1 008 139 observaciones, lo que representa únicamente el 0.037 %. Este resultado indica que, para la frecuencia L1 analizada, la mayoría de las observaciones mantuvieron valores de SNR dentro del comportamiento esperado. Los valores identificados en la cola inferior pueden asociarse con pérdida parcial de señal, baja elevación, obstrucciones temporales o atenuación de la señal recibida.

Para los resultados de **G-Nut/Anubis**, la detección se aplicó sobre indicadores resumidos por satélite, señal o constelación. Por esta razón, el número total de datos analizados es menor que en las series temporales de **TEQC**. Los resultados muestran pocos valores extremos en elevación media, multicamino promedio y SNR promedio por señal y constelación. Además, no se detectaron anomalías en los indicadores resumidos de salud satelital ni de redundancia de observaciones, lo que sugiere un comportamiento estable en estos parámetros durante el periodo analizado.

En el procesamiento con **GIPSY/GipsyX**, se analizaron 727 237 residuales de pseudorango y 727 237 residuales de fase portadora. Para ambos casos se utilizó un criterio bilateral, debido a que los residuales son valores firmados y pueden presentar desviaciones positivas o negativas respecto al modelo PPP. En los residuales de pseudorango se detectaron 7 274 valores extremos, con límites de -2.175 m y 2.495 m. En los residuales de fase portadora se detectaron también 7 274 valores extremos, con límites equivalentes a -21.561 mm y 24.809 mm. Estos valores representan las observaciones con mayor discrepancia respecto al modelo de procesamiento y pueden estar asociados con multicamino, pérdida de seguimiento, baja elevación, errores residuales no modelados o discontinuidades en la señal.

Considerando únicamente los indicadores resumidos en la Tabla 4.2, se analizaron 7 266 758 valores, de los cuales 62 823 fueron clasificados como anomalías estadísticas. Esto corresponde aproximadamente al 0.865 % del total. Este porcentaje debe interpretarse como una medida de valores extremos dentro de las distribuciones analizadas y no como una tasa directa de fallas de la estación. La utilidad principal de esta eta-

pa es proporcionar una lista objetiva de épocas, señales, satélites o indicadores que requieren revisión detallada dentro del monitoreo de calidad de la estación CORS FICU.

En este capítulo se presentaron los principales resultados obtenidos con **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX**. El análisis con **TEQC** permitió evaluar indicadores globales de calidad en archivos RINEX 2.11, incluyendo elevación, azimut, combinación libre de ionosfera, multicamino, SNR, disponibilidad y saltos de ciclo. El procesamiento con **G-Nut/Anubis** complementó este análisis mediante una revisión más detallada de archivos RINEX 3.04 por constelación, señal y satélite. En conjunto, estos resultados permiten caracterizar el comportamiento de la estación CORS FICU y proporcionan la base para la identificación de observaciones anómalas y la evaluación de la calidad de los datos GNSS. Finalmente se escribe una tabla que resume las observaciones anómalas detectadas al implementar el algoritmo estadístico descrito en el capítulo anterior.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

En el capítulo anterior se presentaron y discutieron los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los archivos RINEX de la estación CORS FICU mediante **TEQC**, **G-Nut/Anubis** y **GIPSY/GipsyX**. El análisis se realizó con siete días consecutivos de observaciones para **TEQC** y **G-Nut/Anubis**, mientras que el procesamiento con **GIPSY/GipsyX** se aplicó a un día completo de datos debido a su mayor demanda computacional. A partir de estos procesamientos se obtuvieron indicadores relacionados con multicamino, combinación libre de ionosfera, variación temporal de la combinación ionosférica, relación señal-ruido, disponibilidad de observaciones, saltos de ciclo, residuales de pseudorango y residuales de fase portadora.

En este capítulo se presentan las principales conclusiones derivadas del trabajo realizado, así como algunas recomendaciones para continuar el desarrollo de una metodología automatizada de monitoreo de calidad de observaciones GNSS en estaciones CORS. Estas recomendaciones buscan fortalecer el análisis estadístico, ampliar los indicadores utilizados y orientar trabajos futuros hacia un sistema de monitoreo más robusto y continuo.

5.1. Conclusiones

Después de desarrollar la metodología, procesar los datos y analizar los indicadores de calidad obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La metodología desarrollada permitió calcular, organizar y analizar indicadores relevantes para evaluar la calidad de las observaciones GNSS registradas por la estación CORS FICU. Entre estos indicadores se incluyeron valores de multicamino, relación señal-ruido, disponibilidad de datos, elevación, azimut, geometría satelital, saltos de ciclo y residuales de observación.

- El uso de **TEQC** permitió realizar un control de calidad inicial sobre los archivos RINEX 2.11. Aunque este software ya no cuenta con soporte o actualizaciones recientes, sigue siendo útil para obtener indicadores clásicos de calidad, como *MP1*, *MP2*, relación señal-ruido, disponibilidad de observaciones y saltos de ciclo.

- Los resultados obtenidos con **G-Nut/Anubis** complementaron el análisis realizado con **TEQC**, ya que permitieron trabajar con archivos RINEX 3.04 y analizar las observaciones desde una perspectiva multiconstelación y multifrecuencia. Esto permitió separar la información por constelación, señal y satélite, lo cual resulta fundamental para el monitoreo de estaciones GNSS modernas.

- El procesamiento con **GIPSY/GipsyX** permitió obtener residuales de pseudorango y fase portadora mediante procesamiento PPP con coordenadas fijas. Esta estrategia fue útil para evaluar la calidad de las observaciones sin que los errores fueran absorbidos por la estimación libre de la posición de la estación.

- Los residuales de pseudorango y fase portadora constituyeron indicadores importantes para identificar discrepancias entre las observaciones registradas y el modelo de procesamiento. En particular, los residuales de pseudorango permitieron analizar el comportamiento del código, mientras que los residuales de fase portadora proporcionaron información de mayor precisión sobre la continuidad y estabilidad de la señal.

- La automatización de los procesos de lectura, extracción, organización y graficación de los indicadores permitió estructurar una metodología replicable para otros periodos de observación o para otras estaciones CORS. Esto representa un

paso importante hacia la implementación de un sistema de monitoreo recurrente de calidad de datos GNSS.

- El análisis estadístico de los indicadores permitió establecer una base para la detección de valores atípicos. Aunque en esta tesis se emplearon criterios estadísticos relativamente simples, estos permitieron mostrar que es posible identificar comportamientos anómalos en las observaciones mediante el análisis de las distribuciones y series de tiempo de los indicadores calculados.

- En general, los resultados obtenidos muestran que la integración de herramientas como **TEQC**, **G-Nut/Anubis**, **GIPSY/GipsyX** y scripts desarrollados en Python constituye una estrategia adecuada para el monitoreo de calidad de observaciones GNSS en estaciones de referencia de operación continua.

5.2. Recomendaciones y trabajo a futuro

El análisis estadístico empleado en esta tesis constituye una primera aproximación para la detección de observaciones anómalas. Su aplicación es sencilla y permite identificar valores extremos cuando los indicadores presentan un comportamiento estadístico estable. Sin embargo, para fortalecer la metodología es necesario ampliar el periodo de análisis, incorporar más indicadores y explorar técnicas estadísticas y computacionales más robustas.

A partir del trabajo desarrollado, se proponen las siguientes recomendaciones y líneas de trabajo futuro:

- Establecer límites de detección de anomalías utilizando periodos de observación más extensos. Cuanto mayor sea la cantidad de datos analizados, más representativa será la caracterización del comportamiento nominal de la estación CORS.

- Analizar periodos de varias semanas o meses para identificar patrones diarios, semanales o estacionales en los indicadores de calidad. Esto permitiría distinguir entre anomalías aisladas y comportamientos recurrentes asociados al entorno de la antena.

- Incorporar indicadores adicionales de calidad, como residuales diferenciados respecto a otra estación de referencia, soluciones PPP independientes, errores en el dominio de la posición y métricas derivadas de productos precisos.

- Ampliar el análisis estadístico mediante el uso de estimadores robustos, percentiles adaptativos, pruebas de hipótesis y métodos de detección multivariable. Esto permitiría reducir falsas alarmas y mejorar la identificación de observaciones realmente anómalas.

- Evaluar técnicas de aprendizaje automático para la detección de anomalías, tales como agrupamiento, máquinas de soporte vectorial de una clase, bosques de aislamiento o autoencoders. Estas técnicas podrían aprovechar simultáneamente varios indicadores de calidad y detectar patrones difíciles de identificar mediante umbrales simples.

- Desarrollar un análisis más detallado en el dominio de la posición, considerando variaciones en componentes Este, Norte y Vertical, así como su relación con los indicadores de observación. Esto permitiría estudiar cómo los errores presentes en las mediciones se reflejan en la solución de coordenadas.

- Implementar un sistema automatizado de monitoreo diario que procese los archivos RINEX generados por la estación CORS, calcule indicadores de calidad, genere gráficas, actualice estadísticas de referencia y emita alertas cuando se detecten valores anómalos.

- Extender la metodología a otras estaciones CORS con el fin de comparar comportamientos entre diferentes sitios, identificar efectos locales y evaluar la posibilidad de implementar un sistema regional de monitoreo de calidad GNSS.

Capítulo 6

Glosario de términos

Término / Sigla	Definición
CORS	*Continuously Operating Reference Station*. Estación GNSS de referencia que registra observaciones de manera continua y cuya posición se encuentra determinada con alta precisión.
DCB	*Differential Code Bias*. Sesgo diferencial de código asociado a diferencias instrumentales entre distintas señales o frecuencias GNSS, tanto en los satélites como en los receptores.
DOP	*Dilution of Precision*. Indicador que representa la influencia de la geometría de los satélites sobre la precisión de la solución de posicionamiento. Dependiendo de las componentes consideradas puede expresarse como GDOP, PDOP, HDOP o VDOP.
FCB	*Fractional Cycle Bias*. Sesgo de fase de ciclo fraccionario asociado al satélite o al receptor que afecta la naturaleza entera de las ambigüedades en observaciones no diferenciadas.

Término / Sigla	Definición
FDE	*Fault Detection and Exclusion*. Procedimiento utilizado para detectar una observación defectuosa y excluirla de la solución de posicionamiento con el objetivo de mantener su confiabilidad.
Integridad GNSS	Capacidad de un sistema de posicionamiento para proporcionar información confiable y advertir oportunamente al usuario cuando la solución deja de cumplir los requisitos establecidos.
Combinación libre de ionosfera (IF)	*Ionosphere-Free Combination*. Combinación lineal de observaciones realizadas en dos o más frecuencias que permite eliminar prácticamente el efecto ionosférico de primer orden.
LAMBDA	*Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment*. Método utilizado para facilitar la estimación de ambigüedades enteras mediante la reducción de la correlación existente entre ellas y la búsqueda de los candidatos enteros más probables.
MP1 y MP2	Indicadores obtenidos mediante combinaciones de observaciones de código y fase portadora, utilizados para evaluar principalmente el efecto de multicamino y ruido presente en las observaciones de código de diferentes frecuencias.
NTRIP	*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*. Protocolo utilizado para transmitir datos y correcciones GNSS en tiempo real a través de Internet.

Término / Sigla	Definición
PPP	*Precise Point Positioning*. Técnica de posicionamiento puntual de alta precisión que emplea observaciones de pseudodistancia y fase portadora junto con productos precisos de órbita y reloj satelital y modelos rigurosos de corrección.
PPP-RTK	*Precise Point Positioning – Real-Time Kinematic*. Técnica que combina el procesamiento PPP con correcciones externas de estado espacial para favorecer la resolución rápida de ambigüedades y reducir el tiempo de convergencia.
RAIM	*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*. Técnica de monitoreo autónomo de integridad que utiliza la redundancia de observaciones GNSS para comprobar su consistencia y detectar posibles fallas.
RINEX	*Receiver Independent Exchange Format*. Formato estándar utilizado para almacenar e intercambiar observaciones y datos de navegación GNSS independientemente del fabricante del receptor.
RTCM	*Radio Technical Commission for Maritime Services*. Estándar utilizado para transmitir observaciones y correcciones GNSS, especialmente en técnicas de posicionamiento diferencial y RTK.
RTK	*Real-Time Kinematic*. Técnica de posicionamiento diferencial en tiempo real basada principalmente en observaciones de fase portadora y en el uso de una estación de referencia y un receptor móvil.

Término / Sigla	Definición
Salto de ciclo	*Cycle Slip*. Discontinuidad en el seguimiento de la fase portadora producida cuando el receptor pierde temporalmente el seguimiento continuo de una señal, provocando un cambio entero en el número de ciclos registrados.
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*. Indicador relacionado con la intensidad de la señal recibida respecto al nivel de ruido y utilizado como una métrica para evaluar la calidad de las observaciones GNSS.
TEC	*Total Electron Content*. Cantidad total de electrones libres presentes a lo largo de la trayectoria recorrida por una señal GNSS a través de la ionosfera.

Bibliografía

[1] W. Bertiger, Y. Bar-Sever, A. Dorsey, B. Haines, N. Harvey, D. Hemberger, M. Heflin, W. Lu, M. Miller, A. W. Moore, D. Murphy, P. Ries, L. Romans, A. Sibois, A. Sibthorpe, B. Szilagyi, M. Vallisneri, and P. Willis, "GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research," *Advances in Space Research*, vol. 66, no. 3, pp. 469–489, 2020.

[2] Universidad de Colima, "Dona inegi a la udec equipo para medir deformación volcánica," 2018. Consultado el 20 de mayo de 2026.

[3] P. A. Delgado Ortiz, "Resolución de la ambigüedad de la señal gps de la estación de referencia de operación continua (cors) de la facultad de ingeniería."

[4] S. P. Nakech, A. Musinguzi, and S. Ahimbisibwe, "Quality assessment of cors gps stations in mexico," *Geo-spatial Information Science*, vol. 25, no. 3, pp. 437–451, 2022.

[5] J. B. Ogwang, "Evaluation of gnss cors data quality in uganda," Master's thesis, Makerere University, Uganda, 2018.

[6] H. A. Mamani Gutierrez, "La calidad de datos gnss en las estaciones de operación continua (estudio de caso: Estación r205 la paz)," *Revistas del Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Geomáticas (IIAG)*, 2025.

[7] P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, eds., *GPS for Geodesy*. Berlin, Germany: Springer, 2 ed., 2001.

[8] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House, 3 ed., 2017.

[9] P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, eds., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

[10] G. Xu and Y. Xu, *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 3 ed., 2016.

[11] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Vienna and New York: Springer, 2008.

[12] A. Hauschild, "Basic observation equations," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems* (P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, eds.), pp. 561–579, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

[13] J. A. Klobuchar, "Ionospheric effects on gps," in *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I* (B. W. Parkinson and J. J. Spilker, eds.), pp. 485–515, Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

[14] A. Leick, *GPS Satellite Surveying*. New York: John Wiley & Sons, 2 ed., 1995.

[15] R. B. Langley, "Propagation of the gps signals," in *GPS for Geodesy* (P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, eds.), pp. 111–149, Berlin, Heidelberg: Springer, 2 ed., 1998.

[16] R. B. Langley, "Gps receivers and the observables," in *GPS for Geodesy* (P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, eds.), pp. 151–185, Berlin, Heidelberg: Springer, 2 ed., 1998.

[17] H. S. Hopfield, "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data," *Journal of Geophysical Research*, vol. 74, no. 18, pp. 4487–4499, 1969.

[18] H. S. Hopfield, "Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data," Tech. Rep. TG-1119, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, 1970.

[19] H. S. Hopfield, "Tropospheric range error parameters: Further studies," Tech. Rep. CP-015, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, 1972. Also published as NASA Goddard Space Flight Center Report X-551-72-285.

[20] J. Saastamoinen, "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites," in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy* (S. W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, eds.), vol. 15 of *Geophysical Monograph Series*, pp. 247–251, Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1972.

[21] J. Saastamoinen, "Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part ii. refraction corrections in satellite geodesy," *Bulletin Géodésique*, vol. 107, no. 1, pp. 13–34, 1973.

[22] N. Zhu, D. Bétaille, J. Marais, and M. Berbineau, "Gnss integrity monitoring schemes for terrestrial applications in harsh signal environments," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 12, pp. 81–91, June 2020.

[23] R. G. Brown, "Receiver autonomous integrity monitoring," in *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II* (B. W. Parkinson and J. J. S. Jr., eds.), ch. 5, pp. 143–165, Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 1996.

[24] P. Jia, L. Yang, and E. Zhu, "Application and improvement of teqc in gnss data quality analysis," *Journal of Navigation and Positioning*, vol. 5, no. 03, pp. 77–83, 2017.

[25] T. K. Yeh, C. S. Wang, B. F. Chao, C. S. Chen, and C. W. Lee, "Automatic data-quality monitoring for continuous gps tracking stations in taiwan," *Metrologia*, vol. 44, no. 5, pp. 393–401, 2007.

[26] L. Estey and S. Wier, *Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products*. UNAVCO, Boulder, Colorado, USA, June 2014. Version published June 6, 2014.

[27] A. Bilich, P. Axelrad, and K. M. Larson, "Scientific utility of the signal-to-noise ratio (snr) reported by geodetic gps receivers," in *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, (Fort Worth, Texas, USA), pp. 1999–2010, The Institute of Navigation, Sept. 2007.

[28] D. E. Wells and E. J. Krakiwsky, "Coordinate systems in geodesy," Lecture Notes 16, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1998. Originally published in May 1971; latest reprinting January 1998.

[29] R. Manzano, E. Tai, and K. O'Keefe, "Dense autoencoder-based anomaly detection for gnss cors measurement quality monitoring," in *Proceedings of ION GNSS+ 2026*, Institute of Navigation, Oct. 2026. Aceptado para presentación en Session B3: AI and Machine Learning for GNSS Signal Processing, Error Modeling, and Threat Detection. Forthcoming publication.

[30] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 6 ed., 2014.

[31] G. Casella and R. L. Berger, *Statistical Inference*. Pacific Grove, California: Duxbury, 2 ed., 2002.

[32] W. Gurtner and L. Estey, *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. Astronomical Institute, University of Berne / UNAVCO, Dec. 2007. Available from https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt.

[33] International GNSS Service (IGS) RINEX Working Group and RTCM Special Committee 104, *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04*, Nov. 2018. Based on RINEX Version 3.01 by Werner Gurtner and Lou Estey.

[34] Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences, "Gfzrnx user guide." `https://gnss.git-pages.gfz-potsdam.de/gfzrnx/`, 2025. Consultado el 13 de julio de 2026.

[35] P. Vaclavovic and J. Dousa, "New features of anubis tool for gnss data quality monitoring," in *IUGG 2015*, (Prague, Czech Republic), Geodetic Observatory Pecny, Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, 2015.