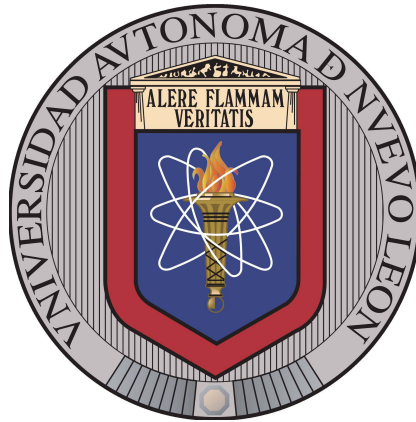


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



ESTUDIO DE ERRORES GNSS Y SU RELACIÓN CON LA
ACTIVIDAD SOLAR Y LA IONÓSFERA

POR

ROGELIO AGUIRRE GUTIÉRREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA
Y TECNOLOGÍAS AFINES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



ESTUDIO DE ERRORES GNSS Y SU RELACIÓN CON LA
ACTIVIDAD SOLAR Y LA IONÓSFERA

POR

ROGELIO AGUIRRE GUTIÉRREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA
Y TECNOLOGÍAS AFINES

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “**Estudio de errores GNSS y su relación con la actividad solar y la ionósfera**”, realizada por el alumno **Rogelio Aguirre Gutiérrez**, con número de matrícula **0051922**, sea aceptada para su defensa como opción al grado de **Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines**.

El Comité de Tesis



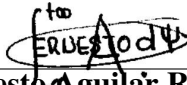
Dra. Esmeralda Romero Hernández
Director



Dr. Giorgio Arlan da Silva Picanço
Co-asesor



Dr. Mario Rodríguez Martínez
Comité Tutor



Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez
Comité Tutor



Dra. Flor Araceli García Castillo
Comité Tutor



Dr. Alvaro Eduardo Cordero Franco
Vo. Bo. / Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Octubre 2025

*Dedico este trabajo a todas las personas
y fuerzas que me han traído hasta aquí...
independientemente del alcance logrado
...y del tiempo invertido,
siempre está mi corazón en el objetivo.*

...como siempre.

Agradecimientos

Agradezco a mi esposa y a mi familia, que han resistido mi obstinación por perseguir mis objetivos, aun poniendo en riesgo todo, están ahí firmes, apoyando y creyendo en mí.

Agradezco a mi asesora la Dra. Esmeralda Romero Hernández por su paciente e incansable labor para forjar y dar forma al profesional que deseamos surja de mis profundidades.

También agradezco el respaldo incondicional del Dr. Giorgio Arlan da Silva Picanço que me ha aportado su ejemplo, su excelente guía y ánimo en este camino, así como a la Dra. Flor Araceli García Castillo que siempre me apoyó en los momentos difíciles, no quiero dejar de mencionar al Dr. Mario Rodríguez Martínez y al Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez por su apoyo y paciencia.

Agradezco con mucho cariño y respeto a la FCFM y toda su gente, desde el director hasta las personas de soporte que hacen de este recinto un lugar perfecto para trabajar y estudiar.

Agradezco a SECIHTI que ha sido fiel a su promesa de apoyo durante este tiempo de estudio.

Además, un agradecimiento especial al proyecto CF-2023-G-364 por el apoyo para la titulación, ya que fue un incentivo muy significativo para continuar hasta el final.

Resumen

En este trabajo se realizó una caracterización de los errores que presentan las señales del *Global Navigation Satellite System* (GNSS) o Sistema Satelital de Navegación Global, asumiendo que una parte de ellos son resultado de la actividad solar y la ionósfera. La variabilidad de la ionósfera se origina por la posición geográfica y actividad geomagnética. Para realizar este estudio se analizaron los registros RINEX de siete estaciones terrestres distribuidas sobre Latinoamérica durante tres años: 2020, 2022, 2024. Se analizaron un total de 2,520 archivos en formato *Receiver INdependent EXchange* (RINEX) y 360 de navegación *Extended Standard Product 3 (Precise Orbit Format)* (SP3c), de los cuales se extrajo la órbita del satélite y posición del receptor, el número de ciclos que se completan en el trayecto satélite-receptor y la posición relativa de cada satélite respecto a cada receptor. Se abordó la detección de los errores GNSS, con software diseñado en Python, su análisis y relación con diferentes factores, como son: la hora local, la latitud geomagnética, el nivel de actividad solar, la elevación y el azimut satelital. Las gráficas y análisis de estos archivos permitió la identificación de tres tipos claves de errores: *cycle-slips*, *outliers*, y *gaps*. Con este análisis, se identificaron patrones en los errores asociados con la ionósfera, lo que sugiere una base para la creación de modelos orientados a estas magnitudes como indicadores de fenómenos específicos en el entorno del clima espacial terrestre.

Se encontró que los *CYCLE-SLIPS* predominaron entre las 18 y las 22 h (hora local). También se cuantificaron los errores, por azimut, y se encontró un patrón de mínimos en el este y el oeste y máximos en el norte y sur. Otro hallazgo fue que los errores tipo *GAP* se incrementaron en estaciones de latitud baja durante el impacto de la tormenta geomagnética del 10 y 11 de mayo de 2024.

Palabras clave: salto de ciclo, cycle-slip, gap, ionósfera, errores gnss, error ionosférico, clima espacial, actividad solar, GPS, GNSS, anomalía vespertina, tormenta geomagnética.

Rogelio Aguirre Gutiérrez.

Candidato para obtener el grado de:

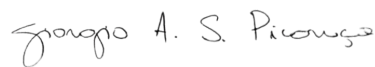
Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines.

Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.



Dra. Esmeralda Romero Hernández

Asesor de Tesis



Dr. Giorgio Arlan da Silva Picanço

Co-asesor de Tesis

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	v
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tablas	xiv
Lista de Acrónimos	xv
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Variabilidad de la Ionósfera y sus Efectos	2
1.3 Problema de Investigación	3
1.4 Justificación y Motivación	3
1.5 Preguntas de investigación	4
1.6 Hipótesis	4
1.7 Objetivo General	4
1.8 Objetivos Específicos	5
1.9 Estructura General del Trabajo	5
2 Marco Teórico	6
2.1 Introducción	6
2.2 Procesos físicos de la ionósfera	6
2.3 Estructura de capas de la ionósfera	7
2.4 La ionósfera como plasma: parámetros clave	7
2.5 Contenido Total de Electrones (TEC)	8
2.6 Propagación de ondas en la ionósfera	9
2.7 Sistema GPS, Observables y Tipos de Errores	10
2.8 Síntesis, Definiciones y Pertinencia	19
3 Metodología	22
3.1 Selección y Preparación de los Datos	22
3.1.1 Selección de las estaciones para el estudio	23

3.1.2	Periodo de estudio	24
3.2	Procesamiento de los Datos	27
3.3	Detección y Clasificación de Errores	29
3.4	Análisis Estadístico	30
4	Resultados y discusión	32
4.1	Errores por Hora Local	35
4.1.1	Totales	35
4.1.2	Por año	35
4.1.3	Por estación o latitud geomagnética	37
4.1.4	Perfiles de errores por hora/año para cada latitud	38
4.2	Errores por Elevación	40
4.2.1	Totales	40
4.2.2	Por Año	41
4.2.3	Por Latitud	42
4.2.4	Perfiles de errores por elevación/año para cada latitud	42
4.3	Errores por Azimut	42
4.4	Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024	45
5	Conclusiones	55
5.1	Trabajo futuro	56
A	Constelaciones del Sistemas GNSS	59
B	Proceso de Foto Ionización	64
C	Estructura de la Ionósfera	67
D	Ionósfera como Plasma	72
E	Contenido Total de Electrones (TEC)	75
F	Propagación de Ondas en el Plasma Ionosférico	77
G	Datos de Actividad Solar	85
H	Nociones de los Archivos RINEX	89
I	Combinaciones Lineales	96
J	Perfiles de errores por hora/año para cada latitud	98
K	Perfiles de errores por elevación/año para cada latitud	103
L	Perfiles de errores por azimut para cada latitud	108

Índice de Figuras

2.1	Esquema volumétrico de referencia para la definición del TEC. Gráfico realizado por el autor.	9
2.2	Principio fundamental del cálculo de pseudo distancia en sistemas GNSS (como GPS), basado en la comparación temporal entre dos secuencias de código Δt . Obtenido de Monico (2002), basado en Wells, et all (1986).	13
3.1	Estaciones GNSS seleccionadas para este estudio. Las líneas de colores indican la inclinación magnética basada en el modelo IGRF-2022.	24
3.2	Comparación del índice K_p registrado en 2020, 2022 y 2024. De acuerdo a este índice, la actividad más intensa se registró en 2024, que corresponde a una fase cercana al máximo de actividad del ciclo solar 25.	25
3.3	Mapas locales de las estaciones. Mapas realizados en Python con la librería “Basemap” por el autor.	26
4.1	Gráfico de los errores separados por tipo: gaps, cycle-slips y outliers acumulados por hora local por los 3 años del estudio. Cada uno dividido según las fechas activa (suma $K_p > 24$) o calma (suma $K_p < 24$).	34
4.2	Total de Errores <i>GAPS</i> por hora local durante los tres años (2020, 2022, 2024) del estudio.	36
4.3	Total de Errores <i>SLIPS</i> por hora local durante los tres años (2020, 2022, 2024) del estudio.	36
4.4	Total de Errores <i>GAPS</i> por hora local por año (2020, 2022, 2024) del estudio.	37
4.5	Total de Errores <i>SLIPS</i> por hora local por cada año (2020, 2022, 2024) del estudio.	38
4.6	Se muestran las 7 estaciones (latitudes) del estudio. Se muestran la totalidad de errores <i>GAP</i> acumulados de los 3 años del estudio por hora local.	39
4.7	Se muestran las 7 estaciones (latitudes) del estudio. los errores <i>CYCLE-SLIPS</i> acumulados de los 3 años del estudio.	39
4.8	Gráfica que muestra el comportamiento de los <i>GAPS</i> unitarios totales acumulados de los 3 años del estudio con respecto a la elevación satelital en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°	40

4.9	Gráfica que muestra el comportamiento de los <i>CYCLE-SLIPS</i> totales acumulados de los 3 años del estudio con respecto a la elevación satelital en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°.	41
4.10	Gráfica de los errores GAPS acumulados por año contra la elevación satelital.	41
4.11	Gráfica de los <i>CYCLE-SLIPS</i> acumulados por año durante los 3 años del estudio.	42
4.12	Gráfica de los GAPS unitarios totales acumulados por los 3 años del estudio de cada estación con respecto a la elevación satelital tomada en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°.	43
4.13	Gráfico del los <i>CYCLE-SLIPS</i> totales acumulados de las 7 estaciones del estudio los 3 años respecto a la elevación satelital tomada en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°.	43
4.14	Gráfica por año de estudio con los errores tipo <i>CYCLE-SLIPS</i> totales por año distribuidos por azimut en ángulos de 15° desde 0° hasta 360°.	44
4.15	Gráfica de los errores tipo GAPS acumulados totales durante los tres años del estudio, distribuidos por azimut en ángulos de 15° desde 0° hasta 360°.	45
4.16	Gráfico de la distribución mensual de los errores por azimut por cada año del estudio.	46
4.17	Gráfico 3D del el perfil de errores diario por horas, y el perfil del azimut de la estación APMA el año 2022. Se aplicó el suavizado Gaussiano para ver la tendencia más claramente del mismo caso.	47
4.18	Gráfico de la cobertura satelital acumulada por los tres años en la posición de la estación APMA. Cada unidad es una época/coordenada(elevación, azimut).	47
4.19	Gráfico del comportamiento de los parámetros más importantes del Sol durante la tormenta geomagnética de mayo de 2024. Gráfico obtenido de spaceweather.com.	51
4.20	Suma acumulada de los errores GNSS en los días previos (azul) / activos (amarillo) relativos a la tormenta geomagnética de mayo 2024, distribuidos por elevación.	51
4.21	Suma acumulada de los errores GNSS en los días previos (azul) / activos (amarillo) relativos a la tormenta geomagnética de mayo 2024, distribuidos por hora UTC.	52
4.22	Tabla con la secuencia de EMC previas. Todas ellas son relevantes, ya que su dirección afecta a la Tierra. Se presenta la fecha y hora UTC de la eyección, su velocidad y el tiempo aproximado de llegada a la Tierra (fecha y hora de llegada). Las fechas de arribo marcadas con negrita y color rojo y azul son dos coincidencias relevantes.	53

4.23	Las marcas de letras en verde corresponde al momento de emisión de la tabla anterior, las marcas de las mismas letras en rojo corresponden a la llegada a la Tierra de dichas masas. Aquí vemos que justo en los dos impactos importantes del día 10 y 11 hubo picos importantes de GAPS y algo menores de CYCLE-SLIPS.	53
4.24	Comparación de los errores GNSS totales de la misma línea de tiempo con la variación del campo magnético B, y los índices Kp y Dst. Datos solares: OMNIWeb Plus Interface. contact: Dr. Natalia Papitashvili, Code 672, Greenbelt, MD 20771.	54
4.25	Mapa de calor de la suma total de errores durante 7 días relativos a la tormenta. Cada fila corresponde a una latitud. Se puede observar la contribución más importante en PTEX y en APMA.	54
A.1	Segmento de control <i>Global Positioning System</i> (GPS)	63
B.1	Perfil vertical de la tasa de producción de iones en la ionósfera, tomando en cuenta la altura, la intensidad de la radiación solar y densidad de los componentes neutros de la atmósfera. Imagen adaptada de Treumann y Baumjohann (1997)	65
C.1	Ionización debida a la radiación solar vs. otras fuentes (Hargreaves, 1992).	68
C.2	Perfiles típicos de la temperatura de la atmósfera neutra y la densidad del plasma con varias capas señaladas. Caso día y caso noche. Adaptado de (Kelley, 2009)	71
C.3	Composición ionosférica basada en mediciones de un espectrómetro de masas durante el día por un año en período de mínimo solar. Tomado de Johnson (1979); Luhmann (1995)	71
J.1	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para PTEX.	99
J.2	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para PTEX.	99
J.3	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para MANA.	99
J.4	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para MANA.	100
J.5	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para QUI3.	100
J.6	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para QUI3.	100
J.7	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para APMA.	100
J.8	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para APMA.	101
J.9	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para TOPL.	101
J.10	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para TOPL.	101
J.11	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para POAL.	101

J.12	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para POAL.	102
J.13	Perfil de errores <i>GAPS</i> por horas por año para MBIO.	102
J.14	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por horas por año para MBIO.	102
K.1	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para PTEX.	104
K.2	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para PTEX.	104
K.3	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para MANA.	104
K.4	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para MANA.	104
K.5	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para QUI3.	105
K.6	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para QUI3.	105
K.7	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para APMA.	105
K.8	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para APMA.	105
K.9	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para TOPL.	106
K.10	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para TOPL.	106
K.11	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para POAL.	106
K.12	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para POAL.	106
K.13	Perfil de errores <i>GAPS</i> por año para MBIO.	107
K.14	Perfil de errores <i>CYCLE-SLIPS</i> por año para MBIO.	107
L.1	Comparación de la cuantificación de los errores totales en PTEX (60°).	109
L.2	Comparación de la cuantificación de los errores totales en MANA (40°).	110
L.3	Comparación de la cuantificación de los errores totales en QUI3 (20°).	111
L.4	Comparación de la cuantificación de los errores totales en APMA (0°).	112
L.5	Comparación de la cuantificación de los errores totales en TOPL (-20°).	113
L.6	Comparación de la cuantificación de los errores totales en POAL (-40°).	114
L.7	Comparación de la cuantificación de los errores totales en MBIO (-60°).	115
L.8	Gráficos de frecuencia de errores en 2020, <i>CYCLE-SLIPS</i> contra azimut y hora local de la estación	116
L.9	Gráficos de frecuencia de errores en 2020, <i>GAPS</i> contra azimut y hora local de la estación	117
L.10	Gráficos de frecuencia de errores en 2022, <i>CYCLE-SLIPS</i> contra azimut y hora local de la estación	118
L.11	Gráficos de frecuencia de errores en 2022, <i>GAPS</i> contra azimut y hora local de la estación	119

L.12	Gráficos de frecuencia de errores en 2024, <i>CYCLE-SLIPS</i> contra azimut y hora local de la estación	120
L.13	Gráficos de frecuencia de errores en 2024, <i>GAPS</i> contra azimut y hora local de la estación	121

Índice de Tablas

2.1	Capas principales de la ionósfera y características físicas predominantes.	7
3.1	Estaciones GPS seleccionadas para este estudio.	25
4.1	Valores comunes de umbral usados para definir un GAP GNSS	34
4.2	Proporción de errores GAPS / SLIPS por año y por banda	35
A.1	Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).	60
A.2	Estado de la constelación <i>GLONASS</i> (julio 2025)	61
A.3	Estado de la constelación <i>BeiDou</i> (julio 2025)	61
A.4	Estado de la constelación Galileo (julio 2025)	61
A.5	Estado de la constelación <i>IRNSS/NavIC</i> (julio 2025)	61
A.6	Estado de la constelación <i>QZSS</i> (julio 2025)	61
A.7	Estado de la constelación GPS (julio 2025)	62
A.8	Resumen comparativo de las constelaciones GNSS (julio 2025)	62
B.1	Energía mínima de ionización de gases de la atmósfera (Lide, 2004).	64
G.1	120 fechas de 2020. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo. .	86
G.2	120 fechas de 2022. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo. .	87
G.3	120 fechas de 2024. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo. .	88
H.1	Popularidad Estimada de las Versiones de RINEX (igs.org).	90
H.2	Evolución histórica de las versiones RINEX, uso actual estimado y comentarios. Datos obtenidos de <i>European Geodetic Reference Frame</i> (EUREF).	91
J.1	Tabla de gráficos con perfiles de errores <i>GAPS</i> y <i>CYCLE-SLIPS</i> por hora por año por estación.	99
K.1	Tabla de gráficos con perfiles de errores <i>GAPS</i> y <i>CYCLE-SLIPS</i> por elevación por año por estación.	103

Lista de Acrónimos

BeiDou	<i>Big Dipper</i>
C/A-Code	<i>Coarse Acquisition Code</i>
CNSA	Administración Espacial Nacional de China
CSV	Comma-Separated Values
DOP	<i>Dilution Of Precision</i>
ECEF	<i>Earth-Centered, Earth-Fixed</i>
EMC	Eyecciones de Masa Coronal
ENU	<i>East-North-Up</i>
ESA	Agencia Espacial Europea
EUREF	<i>European Geodetic Reference Frame</i>
EUSPA	<i>European Union for the Space Programme Agency</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organisation</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
NavIC	<i>Navigation Indian Constellation</i>
NAVSTAR	<i>NAVigation Satellite Timing And Ranging</i>
PRN	<i>Pseudo Random Number</i>

QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RINEX	<i>Receiver INdependent EXchange</i>
ROSCOSMOS	Agencia Espacial Federal de Rusia
SA	Selective Acquisition
SP3c	<i>Extended Standard Product 3 (Precise Orbit Format)</i>
STEC	<i>Slant TEC</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UVE	rayos Ultra Violeta Extremo
VTEC	<i>Vertical TEC</i>

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

La ionósfera, ubicada aproximadamente entre los 60 y más de 1,000 km sobre la superficie terrestre, constituye una región de importancia crítica por su elevada concentración de electrones y iones libres que impacta significativamente a las señales de radio que se propagan a través de ella. (Kelley, 2009; Duhau y Azpiazú, 1981).

Desde su descubrimiento, la ionósfera ha despertado un interés constante por parte de la comunidad científica, debido a sus propiedades únicas y su influencia en las comunicaciones. El estudio de esta capa atmosférica ha planteado retos significativos, desde el aprovechamiento de su capacidad para reflejar ondas de radio -lo que permite extender su alcance- hasta el desarrollo de tecnologías capaces de medirla y estimar su conexión con otros fenómenos, en particular con la actividad solar (Kelley, 2009).

Debido a su posición en la parte superior de la atmósfera, la ionósfera está expuesta a radiación poderosa proveniente del espacio exterior, como los rayos Ultra Violeta Extremo (UVE), los rayos X. En particular, estos rayos son responsables del proceso de fotoionización que da origen a esta región. Además de esta radiación, están las colisiones de partículas cargadas del viento solar, provocadas por Eyecciones de Masa Coronal (EMC) de las tormentas geomagnéticas, que también pueden ionizar el gas neutro al encontrar a la Tierra en su camino (Kelley, 2009).

En la actualidad, esta influencia mencionada es especialmente relevante en aplicaciones modernas como los sistemas globales de navegación por satélite (GPS), ya que su contribución en los errores de posicionamiento se considera de las más importantes. La perturbación causada por la ionósfera puede representar la principal fuente de error en la determinación de posiciones precisas (Rishbeth, 2003).

Las señales satelitales usadas para el posicionamiento global son registradas en todo el planeta mediante receptores especializados, los cuales permiten conservar esa información de forma precisa. Estos datos se almacenan en archivos bajo protocolos estandarizados, lo que facilita su uso en diversos tipos de análisis, tanto científicos como profesionales y comerciales. Además, estos receptores contribuyen al estudio de la geodesia y al seguimiento de los movimientos precisos de la Tierra en su órbita (Gurtner y Estey, 2007).

En este escenario global, la región latinoamericana enfrenta una compleja dinámica geomagnética. La variabilidad causada por los factores mencionados convierten la estimación del retraso ionosférico en un desafío particular para la mejora y corrección de los errores de posicionamiento global. El aumento de usuarios de GPS y el creciente uso de aplicaciones críticas en la región lo evidencian. El uso de la combinación L1-L2 permite analizar los efectos adversos de la ionósfera, la cantidad de electrones libres se vuelve un parámetro clave (da Silva Picanço, 2019).

1.2. Variabilidad de la Ionósfera y sus Efectos

La estructura de la ionósfera responde principalmente a la radiación solar, considerando factores como la hora local, la latitud geomagnética, la época del año y los ciclos de actividad solar. Fenómenos típicos en la región latinoamericana, como la *anomalía ecuatorial* y la *anomalía equinoccial*, evidencian la estrecha relación entre la ubicación, la geometría magnética y las variaciones de la densidad de electrones libres en la ionósfera. Estas fluctuaciones afectan de manera directa la propagación y precisión de las señales GNSS, repercutiendo en la calidad de los datos de posicionamiento y navegación (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007; Monico, 2002).

La ionósfera no solo afecta el camino de las señales; su variabilidad estacional y la

respuesta frente a tormentas geomagnéticas, por ejemplo, pueden ocasionar pérdidas de señal o errores de gran magnitud en aplicaciones críticas (Magdaleno Torras, 2014).

Valero *et al.* (2019) analiza profundamente los errores GNSS en su capítulo “Fuentes de Error” en donde en general sugiere que los errores GNSS son desviaciones en la señal recibida por el receptor respecto a la posición real, causadas por factores como la atmósfera (ionósfera y tropósfera), errores de reloj, geometría de los satélites, multi-trayectoria y ruido del receptor. Estos errores afectan la precisión, fiabilidad y disponibilidad del posicionamiento satelital.

El estudio de los errores GNSS abarca múltiples fuentes, pero en este trabajo se restringe el análisis a aquellos vinculados con la ionósfera. Se excluyen los errores técnicos propios del receptor, con excepción del salto de ciclo (*cycle-slip*), atribuido por Valero *et al.* (2019) tanto al receptor como a condiciones ionosféricas. También se considera el *gap* o “hueco”, definido como la ausencia de datos satelitales cuando el satélite está sobre el horizonte del receptor en un momento determinado, lo cual puede deberse a fallas del satélite, del receptor o del medio de propagación de la señal Valero *et al.* (2019).

1.3. Problema de Investigación

Este estudio aborda la variabilidad de la ionósfera como un fenómeno multifactorial, analizando su impacto específico en errores GNSS —como *gaps*, *cycle-slips* y *outliers*. Se consideran como variables independientes la actividad solar, factores geográficos y geomagnéticos (incluyendo la hora local), así como las posiciones satelitales, con el objetivo de identificar su influencia diferenciada sobre dichos errores.

1.4. Justificación y Motivación

La ionósfera es como un laboratorio natural y su estudio es fundamental para comprender los procesos físicos que resultan de la interacción dinámica entre el Sol y la Tierra. Entre los distintos métodos disponibles para su caracterización, el uso de señales GNSS

ofrece una vía eficaz para observar su variabilidad y, al mismo tiempo, posibilita extraer y analizar información valiosa incluso en presencia de perturbaciones y ruido en las señales. Esta aproximación no solo permite abordar cuestiones clave en el entendimiento del comportamiento ionosférico, sino que también, mediante pequeñas adaptaciones, contribuye a optimizar sistemas ya existentes y ampliar su potencial en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas. Así, el presente trabajo busca aportar al conocimiento físico de la ionósfera desde una perspectiva que facilita tanto el avance en la comprensión fundamental del fenómeno, como la mejora práctica de herramientas de monitorización.

1.5. Preguntas de investigación

- ¿Cómo influyen la posición satelital, la actividad solar, la hora del día y la latitud geomagnética en los errores observados en GNSS?
- ¿Los *errores GNSS* podrían ser usados como evidencia de fenómenos físicos de tal forma que puedan ser usados como indicadores u observables?

1.6. Hipótesis

Los errores de posicionamiento están relacionados con el retardo ionosférico que registra el *sistema GNSS*, los cuales a su vez están asociados con la actividad solar, la época del año, la hora del día y la posición geográfica. La ocurrencia de errores GNSS tipo *cycle-slip* y *gaps* está relacionada con la elevación de los satélites, la actividad solar tanto del ciclo solar como de las variaciones diarias registradas en el índice Kp y la latitud geomagnética.

1.7. Objetivo General

Caracterizar y contabilizar los tipos de errores presentes en las señales del GNSS – bandas L1 y L2 del GPS – detectadas por un conjunto de siete estaciones distribuidas en Latinoamérica para los años 2020, 2022 y 2024.

1.8. Objetivos Específicos

1. **Elevación.** Analizar la relación entre el ángulo de **elevación** satelital y la frecuencia de los errores GNSS.
2. **Hora Local.** Analizar la distribución horaria de errores GNSS cuantificados en función de la hora local.
3. **Azimut.** Analizar la distribución direccional de errores GNSS en función del **azimut** satelital.
4. **Caso de Estudio.** Análisis de los errores GNSS durante la tormenta geomagnética de mayo 2024.

1.9. Estructura General del Trabajo

Los capítulos siguientes abordan el marco teórico asociado a la ionósfera y los sistemas GNSS (ver Apéndice A), la metodología empleada para el análisis de datos, detallando los pasos desde la recopilación, tratamiento y reducción de los datos, hasta la obtención de resultados y su discusión final. Con este panorama contextual y técnico, el siguiente capítulo aborda los fundamentos teóricos necesarios para comprender la dinámica de la ionósfera y su interacción con los sistemas GNSS.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Introducción

Como se expuso en la introducción general, la ionósfera desempeña un papel fundamental en la propagación de señales GNSS. Este capítulo desarrolla los fundamentos físicos, matemáticos y técnicos que explican la dinámica ionosférica, sus efectos sobre las señales de navegación, y los modelos utilizados para interpretar los *errores GNSS* generados. Las deducciones extensas o demostraciones matemáticas detalladas se presentan en los apéndices correspondientes.

2.2. Procesos físicos de la ionósfera

La ionósfera, expuesta a los *rayos X* y *UVE* procedentes principalmente del Sol, como se explicó en el Capítulo 1, genera un dinámico y complejo plasma de electrones libres y iones. El equilibrio dinámico entre la tasa de producción (q) y la recombinación (αN_e^2) determina la densidad de electrones, N_e . La ecuación básica que describe este balance es:

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e^2 \quad (2.1)$$

La variación en altura, hora, estación y actividad solar produce perfiles diurnos y estacionales característicos. **Nota:** La derivación detallada de esta ecuación y los valores de q , α para especies atmosféricas clave se presentan en el Apéndice B.

2.3. Estructura de capas de la ionósfera

La ionósfera se divide en capas (D, E, F1, F2, y región superior) según su composición y densidad electrónica máxima, como se resume en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1: Capas principales de la ionósfera y características físicas predominantes.

Capa	Altitud típica (km)	Principal especie ionizada
D	60 $\rightarrow$ 90	NO^+ , O_2^+
E	90 $\rightarrow$ 150	O_2^+ , NO^+
F1	150 $\rightarrow$ 200	O^+ , NO^+
F2	200 $\rightarrow$ 1000	O^+
Región Superior	1000 $\rightarrow$	H^+ , He^+

Cada una de estas capas posee propiedades interesantes y sus cambios responden de manera única a la variabilidad de las condiciones del entorno local que involucra principalmente al sistema Sol-Tierra. El desarrollo histórico y experimental sobre estas capas puede consultarse con más detalle en el Apéndice C.

2.4. La ionósfera como plasma: parámetros clave

La ionósfera exhibe atributos, tales como la frecuencia de plasma (f_p), longitud de Debye (λ_D), y conductividad anisótropa.

Como un plasma, los electrones libres exhiben un comportamiento característico que los obliga a oscilar naturalmente en respuesta a perturbaciones en la distribución de cargas eléctricas. Esta oscilación colectiva se conoce como la frecuencia de plasma, y su valor es crítico para determinar cómo el plasma interactúa con las señales electromagnéticas que atraviesan la ionósfera (Fitzpatrick, 2022).

Se define con la siguiente expresión:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2.2)$$

donde N_e es la densidad electrónica, e la carga del electrón, ϵ_0 la permitividad del vacío, f_p es la frecuencia del plasma y m_e es la masa del electrón. Se puede ver que la frecuencia disminuye con el aumento de la masa de la partícula involucrada, en este caso tratamos el electrón; sin embargo, esta expresión es válida con iones más pesados. También vemos que aumenta con la densidad de los electrones (Fitzpatrick, 2022).

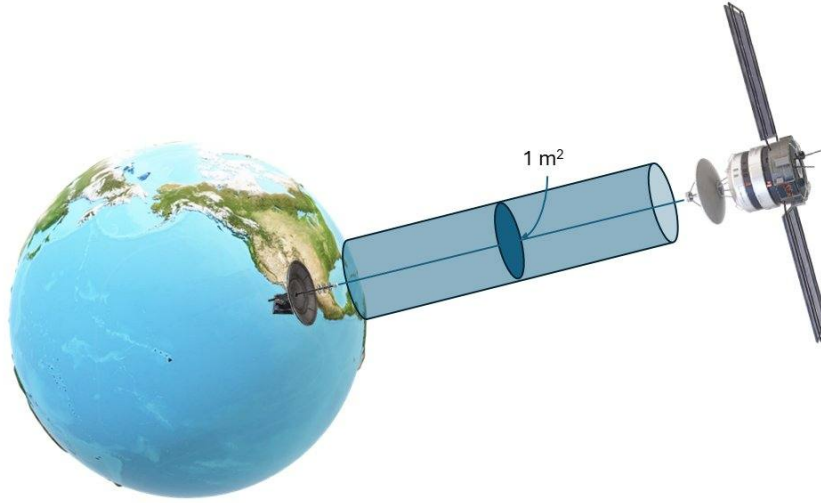
De aquí se obtiene la ecuación de dispersión que describe cómo las ondas electromagnéticas se propagan en un plasma. En un plasma sin colisiones, esta ecuación de dispersión se obtiene combinando las ecuaciones de Maxwell con la respuesta de los electrones al campo:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (2.3)$$

donde ω es la frecuencia angular de la señal electromagnética atravesando el medio, ω_p es la frecuencia del plasma descrito en (2.2) que depende de la densidad de los electrones, k es el número de onda, parámetro relacionado con la longitud de onda de la señal y c es la velocidad de la luz en el vacío. Ver el Apéndice D para ver la deducción con más detalle.

2.5. Contenido Total de Electrones (TEC)

En el estudio de la ionósfera, la densidad de electrones en el contexto de los sistemas GNSS suele representarse mediante el término *Total Electron Content* (TEC), que se define como la cantidad total de electrones por metro cuadrado a lo largo de la línea de visión entre los satélites y las estaciones receptoras (ver figura 2.1). Las unidades de TEC se denominan *Total Electron Content Unit* (TECU) (donde $1 \text{ TECU} = 10^{16} e^-/m^2$) (Schaer *et al.*, 1996). El TEC es considerado el parámetro fundamental para la monitorización y vigilancia de la ionósfera (Gatica-Acevedo *et al.*, 2015; Klobuchar, 1996).



El TEC ionosférico (TOTAL ELECTRON CONTENT) es la Cantidad de Electrones Libres que se encuentran por metro cuadrado a lo largo de un cilindro que cubre la línea de visión de un satélite GNSS a una estación receptora o usuario.

Figura 2.1: Esquema volumétrico de referencia para la definición del TEC. Gráfico realizado por el autor.

El TEC es el parámetro clave para cuantificar el efecto ionosférico en GNSS:

$$TEC = \int_{sat-rec} N_e ds \quad (2.4)$$

Se diferencia entre $STEC$ (*Slant* TEC, en trayectoria oblicua) y $VTEC$ (Vertical TEC).

La conversión involucra la función de mapeo $F_I(z)$:

$$STEC = \frac{VTEC}{\cos(z')} \quad (2.5)$$

donde z' es el ángulo cenital en la capa ionosférica efectiva. La deducción se puede ver en el Apéndice E.

2.6. Propagación de ondas en la ionósfera

Las señales GNSS, al atravesar el plasma ionosférico, se ven afectadas por el índice de refracción n :

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad (2.6)$$

El efecto dominante es el “retraso ionosférico”, cuya expresión general para una señal de frecuencia f es:

$$\Delta t = \frac{40.3}{c} \cdot \frac{TEC}{f^2} \quad (2.7)$$

donde TEC es el Contenido Total de Electrones a lo largo de la trayectoria. El detalle matemático de la deducción de n y Δt está en el Apéndice F.

El retardo ionosférico está directamente relacionado con la línea de visión entre el satélite y el receptor, por lo que debe manejarse adecuadamente para obtener resultados generalizables. Los valores obtenidos deben corregirse para eliminar las contribuciones de la localización, desfases de relojes, el Doppler, los efectos de la relatividad y condiciones meteorológicas locales (Klobuchar, 1996; Galdyn *et al.*, 2023; da Silva Picanço, 2019).

2.7. Sistema GPS, Observables y Tipos de Errores

El Sistema GNSS

Las señales que emiten los satélites GPS, (en general del sistema (GNSS) tienen como finalidad central la emisión de la referencia de tiempo más precisa que se ha podido generalizar en todo el planeta. Esa es la condición para que los dispositivos localizadores funcionen de manera precisa: el tiempo exacto está distribuido globalmente y eso permite que los dispositivos localizadores calculen la posición precisa para todos (Sardón *et al.*, 1993).

Debido al tipo de órbita que caracteriza a la mayoría de los sistemas GNSS (ubicada aproximadamente a 20,000 km sobre la superficie terrestre), los satélites operan por encima de la ionósfera. En su trayecto hacia los receptores en superficie, las señales emitidas, que contienen la información esencial para el cálculo de la posición, atraviesan las capas atmosféricas y experimentan fenómenos de refracción (de los que ya hablamos en secciones anteriores) inducidos por el plasma ionosférico. Este efecto es particularmente relevante en las señales de la banda L (con frecuencias comprendidas entre 1 y 2 GHz), las cuales se encuentran dentro del rango de las ondas de ultraalta frecuencia (*Ultra High Frequency* (UHF)). La magnitud de la refracción ionosférica está estrechamente relacionada con

el TEC, incrementándose de manera aproximadamente proporcional a medida que esta cantidad aumenta (Gurtner y Estey, 2007).

En general, los registros de datos GNSS, se recogen en repositorios que guardan de forma organizada y al alcance de interesados con la finalidad de realizar análisis de muy diversa naturaleza. Estos archivos se conocen como RINEX. Son muy útiles en mediciones geodésicas o cartografía, así como en ingeniería y agrimensura legal (Gurtner, 2009).

Estos archivos, en general, presentan errores que en términos generales se les suele llamar: *errores GNSS* y se asocian a diversos factores que a continuación mencionaremos.

Las señales GPS sufren efectos que alteran sus magnitudes de diversas formas. Estos errores en las señales GPS pueden clasificarse en varios tipos según su origen y tipo.

- **Error de Reloj del Satélite:** Pequeñas desviaciones temporales que afectan los cálculos de posicionamiento (Kaplan y Hegarty, 2017).
- **Error de Reloj del Receptor:** Los relojes de los receptores, de menor calidad que los satélites, tienen un ciclo de corrección periódico, los errores aumentan mientras haya diferencias (Misra, 2006).
- **Error de Trayectoria de la Señal (Múltiples-trayectorias):** Reflexión desordenada de la señal con objetos terrestres que confunden al receptor y provocan errores de lectura de los observables (Spilker Jr *et al.*, 1996).
- **Error de Efemérides:** Por diferentes factores, los satélites se mueven ligeramente de su órbita y por ello son monitorizados y corregida cuando sale de ciertos parámetros (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2012).
- **Error de Tropósfera:** La señal GPS, al pasar a través de la tropósfera, es afectada por la refracción producida por la densidad del aire neutro y la humedad (Spilker Jr *et al.*, 1996).
- **Error Ionosférico:** La ionósfera, al ser una capa de la atmósfera cargada eléctricamente, afecta la velocidad de las señales GPS, introduciendo un retraso que depende de la densidad de electrones (TEC) (Hernández-Pajares *et al.*, 2011).

- **Dilución de Precisión (*Dilution Of Precision* (DOP))**: La posición de los satélites en relación con el usuario afecta la precisión de la solución GPS (Langley, 2007).
- **Error Humano**: La mayor fuente potencial de error en cualquier observación GNSS son los humanos. Podríamos medir el punto equivocado, utilizar el *datum* incorrecto, mover la antena inapropiadamente, anotar las coordenadas incorrectamente, observar durante un tiempo demasiado corto o algún otro error en nuestro proceso o la simple falta de supervisión y mantenimiento de los equipos (Kaplan y Hegarty, 2017).
- **Interferencia y Ruido en el Receptor**: Señales de radio de otras fuentes (intencionales o no intencionales) pueden interferir con las señales GPS, degradando la precisión (Kaplan y Hegarty, 2017).
- **Error Selectivo (*Selective Acquisition* (SA))**: Durante varios años el gobierno de EE. UU. introdujo un error intencional en las señales GPS para degradar la precisión con fines militares. Este error fue desactivado en mayo de 2000 (Zumberge y Gendt, 2001).

Cada error mencionado contribuye en mayor o menor medida a la inexactitud de las mediciones GPS. De todos estos errores, ¿cuáles tienen que ver con la ionósfera? ¿Qué tanto es ruido que afecta la estimación del TEC? O ¿Qué tanto puede ser utilizado como otro parámetro para analizar la ionósfera? El enfoque de este trabajo va encaminado a entender los factores que afectan los errores GNSS que impactan los archivos RINEX que, a su vez, impactan en el valor del TEC y con ello el del retardo provocado por la refracción ionosférica. Estos errores involucran los datos que se registran en los archivos RINEX, estos son los Observables.

Observables

Los observables GNSS son valores que se deducen de las diferencias de tiempo o fase medidas a partir de una comparación entre las señales recibidas desde el satélite y las señales generadas por el receptor, como se ve en la figura 2.2. Los mensajes deben ser identificados y decodificados por el receptor y proceder a los filtros configurados. A

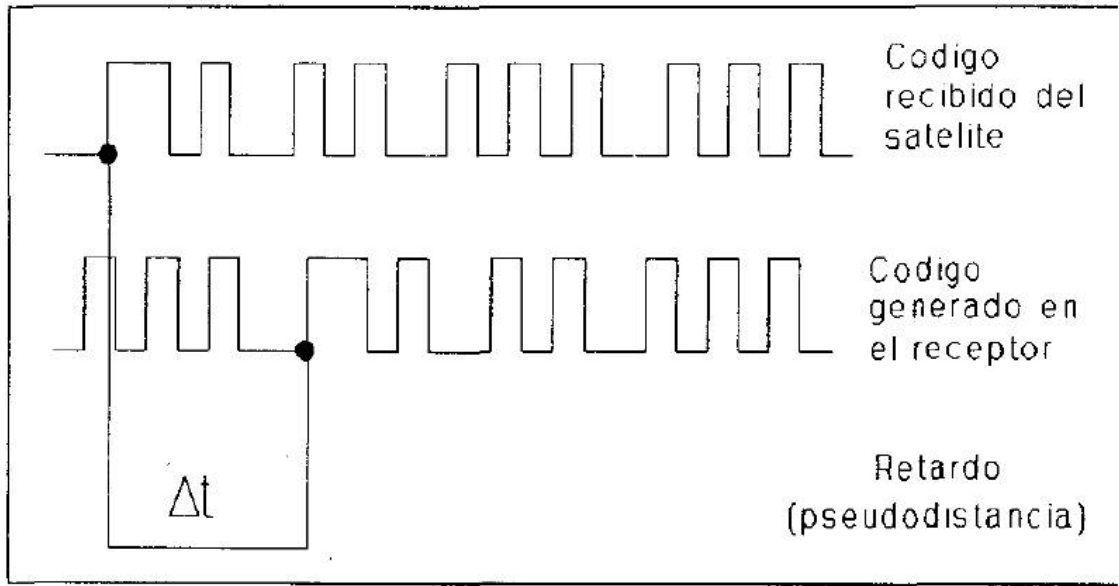


Figura 2.2: Principio fundamental del cálculo de pseudo distancia en sistemas GNSS (como GPS), basado en la comparación temporal entre dos secuencias de código Δt . Obtenido de Monico (2002), basado en Wells, et all (1986).

diferencia de las mediciones de distancia electrónicas terrestres, la navegación por satélite utiliza el “concepto unidireccional”, en el que intervienen dos relojes, uno en el satélite y otro en el receptor y este último es un esclavo del tiempo dado por la mayor precisión de los relojes satelitales. Por lo tanto, los rangos están sesgados por los errores de reloj del satélite δ^i y del receptor δ_k que son actualizados de acuerdo a reglas muy precisas pero no inmediatas, de ahí el nombre de pseudorango (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007).

Los observables fundamentales de los sistemas satelitales son:

- el mencionado pseudorango $P_{Fk}^i(t)$ en metros para la frecuencia F entre el receptor k y el satélite i en la época t ,
- la fase $\psi_{Fk}^i(t)$ que es el conteo de ciclos completos de la señal de frecuencia F desde la antena del satélite i hasta el receptor k en tierra en la época t ,
- el tiempo de lectura de la señal t_k en el receptor k que, si se considera que posee un error δ_k , el tiempo GPS de llegada de la señal se puede estimar en $t = t_k - \delta_k$.
- y el tiempo τ que equivale a la demora de la señal al viajar del satélite al receptor.

Considerando τ el lapso de tiempo que demora la señal del satélite al receptor, es

posible definir una distancia asociada al recorrido de la señal en dicha trayectoria:

$$\varrho_k^i = c\tau \quad (2.8)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Sea $r_k(t)$ la posición del receptor k en el tiempo de recepción de la señal t en tiempo GPS y $r^i(t - \tau)$ la posición del satélite i en el tiempo de la emisión $t - \tau$ (Dach *et al.*, 2015). Se tiene que:

$$\varrho_k^i = |\mathbf{r}_k(t) - \mathbf{r}^i(t - \tau)| \quad (2.9)$$

expresando δ_k como el error del reloj del receptor con respecto al tiempo GPS. El instante de llegada de la señal se puede escribir como:

$$t = t_k - \delta_k \quad (2.10)$$

en la misma forma se puede representar el error del reloj del satélite como δ^i en el instante de la emisión $t - \tau$. De la expresión del pseudorango mostrada en la ecuación (2.9) haciendo una aproximación de Taylor de primer orden para $\mathbf{r}^i(t - \tau)$ se puede reducir a esta otra expresión:

$$\mathbf{r}^i(t - \tau) = \mathbf{r}^i(t) - \dot{\mathbf{r}}^i(t)\tau \quad (2.11)$$

que al sustituirla en (2.8) y (2.9) y, haciendo el desarrollo algebraico, llegamos a esta solución cuadrática para: τ :

$$(c^2 - \dot{\mathbf{r}}^i(t) \cdot \dot{\mathbf{r}}^i(t)) \tau^2 - 2\dot{\mathbf{r}}^i(t) (\mathbf{r}_k(t) - \mathbf{r}^i(t)) \tau - (\mathbf{r}_k(t) \cdot \mathbf{r}_k(t) - 2\mathbf{r}_k(t) \cdot \mathbf{r}^i(t) + \mathbf{r}^i(t) \cdot \mathbf{r}^i(t)) = 0 \quad (2.12)$$

Utilizando los códigos conocidos modulados en los portadores GPS, los receptores pueden medir las cantidades como:

$$P_k^i = c((t + \delta_k) - (t - \tau + \delta^i)), \quad (2.13)$$

al cual se le llama pseudorango (por la imprecisión debida a los errores de reloj del satélite y del receptor), pero introduciendo la distancia geométrica ϱ_k^i , el pseudorango de código

para la frecuencia F también se puede escribir como

$$P_{Fk}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i \quad (2.14)$$

Con las fases, el receptor identifica cada satélite i gracias a su *Pseudo Random Number* (PRN) que llega en la señal. El receptor crea una copia de la señal PRN, ajustada al reloj del receptor, y la compara con la señal original del satélite. Analiza el desfase que tienen y así obtiene el valor de τ

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_F^i(t - \tau) + n_{Fk}^i, \quad (2.15)$$

donde $\psi_{Fk}^i(t)$ es la medida de la fase (en ciclos) en la época t y la frecuencia F entre la estación k y el satélite i , $\phi_{Fk}(t)$ es la fase generada por el oscilador del receptor en el instante de la recepción de la señal t , $\phi_F^i(t - \tau)$ es la fase de la portadora en el momento de la emisión $t - \tau$, y n_{Fk}^i es un entero desconocido con el número de ciclos.

La precisión de las mediciones de fase es de aproximadamente 1–3 mm, pero el número exacto de longitudes de onda enteras n_k^i entre el satélite y el receptor no se conoce en el momento de la primera medición. El número entero desconocido de ciclos n_k^i que se deben agregar a la medición de fase para obtener un pseudorango se denomina ambigüedad de fase inicial. Esta ambigüedad de fase tiene el mismo valor mientras el receptor mantenga el bloqueo de la fase transmitida por el satélite (Dach *et al.*, 2015).

Usando la aproximación de Taylor en la última ecuación (2.15), se puede reescribir así

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_F^i(t) + \tau f_F + n_{Fk}^i, \quad (2.16)$$

donde f_F es la frecuencia de la onda portadora. La diferencia $\phi_{Fk}(t) - \phi_F^i(t)$ es cero en el caso de los osciladores ideales e igual a $(\delta_k - \delta^i)f_F$ si el error del reloj del receptor δ_k y el error del reloj del satélite δ^i son tomados en cuenta. La ecuación (2.16) entonces se convierte en

$$\psi_{Fk}^i(t) = (\delta_k - \delta^i)f_F + \tau f_F + n_{Fk}^i. \quad (2.17)$$

Multiplicando esta ecuación por la longitud de onda λ_F obtenemos la observación de la

fase L_{Fk}^i (en metros) (Dach *et al.*, 2015):

$$L_{Fk}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \lambda_F n_{Fk}^i. \quad (2.18)$$

Aunque las mediciones de fase y los pseudorangos de código se ven afectados tanto por errores sistemáticos como aleatorios. Existen muchas fuentes de errores sistemáticos: órbitas de satélites, relojes de satélites y receptores, medio de propagación, efectos relativistas y variaciones del centro de fase de la antena, por nombrar solo algunos (Dach *et al.*, 2015). Aquí nos proponemos analizar solo uno de los casos, y nos referimos a los errores causados por la refracción ionosférica.

Mencionaremos que los satélites de la constelación GPS actualmente son capaces de transmitir un conjunto de señales moduladas en las siguientes bandas de frecuencia: L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz), L5 (1176.45 MHz) (Mishra *et al.*, 2020).

Conectando lo expuesto en la sección anterior, la refracción ionosférica en una primera aproximación, sabemos que es proporcional a $1/f^2$ donde f es la frecuencia de la onda portadora. En la notación planteada ahora, la ecuación (F.43) se usará I_k^i como la refracción ionosférica entre el satélite i y el receptor k para la frecuencia L_1 . Para el caso L_2 se puede escribir la refracción ionosférica tomando en cuenta la primera escribiendo $(f_1^2/f_2^2)I_k^i$ (Dach *et al.*, 2015).

De las ecuaciones mencionadas antes tenemos que los observables GPS pueden ser definidos por las ecuaciones siguientes:

$$P_{1k}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + I_k^i + \Delta\varrho_k^i \quad (2.19)$$

$$P_{2k}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i + \Delta\varrho_k^i \quad (2.20)$$

$$L_{1k}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - I_k^i + \Delta\varrho_k^i + \lambda_1 n_{1k}^i \quad (2.21)$$

$$L_{2k}^i = \varrho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i + \Delta\varrho_k^i + \lambda_2 n_{2k}^i \quad (2.22)$$

Es posible notar la simetría de estas ecuaciones. La existencia de al menos dos frecuencias (L_1 y L_2) es suficiente para notar la permanencia de sesgos y desviaciones que permanecen

constantes en ambas frecuencias, lo que permite su eliminación mediante la diferencia de las ecuaciones relacionadas. Este proceso llamado en inglés “*differential code biases*” se toma en cuenta para la eliminación de esos parámetros que son invariantes ante el cambio de frecuencia (Dach *et al.*, 2015).

Para este proceso se aplican las diferencias simples, las diferencias dobles y en ocasiones las diferencias triples. La notación que usaremos para analizar las diferencias para la eliminación de sesgos será la siguiente. La diferencia simple es así:

$$L_{Fkl}^i = L_{Fk}^i - L_{Fl}^i \quad (2.23)$$

esta ecuación representa la diferencia de las L de la frecuencia F del satélite i recibidas por dos estaciones k y l . Para el caso de la doble diferencia se tiene:

$$L_{Fkl}^{ij} = L_{Fkl}^i - L_{Fkl}^j \quad (2.24)$$

De estas dos últimas ecuaciones se derivan de manera directa las ecuaciones de los observables básicos de las señales GPS.

$$P_{1kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} + I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} \quad (2.25)$$

$$P_{2kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} \quad (2.26)$$

$$L_{1kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} + \lambda_1 n_{1kl}^{ij} \quad (2.27)$$

$$L_{2kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} + \lambda_2 n_{2kl}^{ij} \quad (2.28)$$

Gracias a las ecuaciones de las dobles diferencias, los errores de reloj, tanto de los receptores como de los satélites, son eliminados (se asume que los errores de los relojes de los receptores son conocidos con la suficiente precisión como para calcular las distancias ϱ de manera correcta (Dach *et al.*, 2015).

Para realizar la triple diferencia se utilizan dos estaciones (receptores), dos satélites y dos épocas diferentes. Estas son utilizadas por los sistemas de software como el Bernese

para el preprocesamiento de los datos GPS.

$$L_{1kl}^{ij}(t_2) - L_{1kl}^{ij}(t_1) = \varrho_{kl}^{ij}(t_2) - \varrho_{kl}^{ij}(t_1) - \left(I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1) \right) \quad (2.29)$$

$$L_{2kl}^{ij}(t_2) - L_{2kl}^{ij}(t_1) = \varrho_{kl}^{ij}(t_2) - \varrho_{kl}^{ij}(t_1) - \frac{f_1^2}{f_2^2} \left(I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1) \right) \quad (2.30)$$

En las ecuaciones (2.29) y (2.30) se asume que los parámetros de ambigüedad desconocidos n_{1kl}^{ij} y n_{2kl}^{ij} permanecen iguales dentro del intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$ y que, por lo tanto, se eliminaron las ambigüedades de fase (la principal ventaja de las diferencias triples). Esto es cierto si los receptores no perdieron el sincronismo dentro de este intervalo de tiempo y si no se produjo ningún deslizamiento de ciclo (en inglés *cycle slip*). La refracción troposférica generalmente no cambia rápidamente con el tiempo y, por lo tanto, se reduce considerablemente en el nivel de la triple diferencia. Sin embargo, esto no es cierto para la refracción ionosférica, que puede mostrar variaciones muy rápidas en el tiempo, particularmente en altas latitudes norte y sur (Dach *et al.*, 2015).

En las ecuaciones (2.18) y (2.14) vemos que las expresiones $c\delta_k$ pueden eliminarse al hacer la diferencia de mediciones entre dos satélites y el término $c\delta_i$ haciendo la diferencia entre dos receptores. Sin embargo, esto no significa que el error del reloj del receptor δ_k se elimine por completo en las diferencias. Al ver las ecuaciones (2.10) y (2.9) queda claro que para calcular la distancia geométrica entre el satélite y el receptor en el tiempo t (en la escala del tiempo GPS), debe conocerse el error de reloj del receptor δ_k para corregir la lectura del reloj del receptor t_k (Dach *et al.*, 2015).

$$\varrho_k^i(t) = \varrho_k^i(t_k - \delta_k) \quad (2.31)$$

si tomamos el diferencial de esta ecuación se tiene:

$$d\varrho_k^i = -\dot{\varrho}_k^i d\delta_k \quad (2.32)$$

donde $\dot{\varrho}_k^i$ es la velocidad radial del satélite con respecto al receptor. Esta velocidad tiende a cero cuando el satélite está en el punto de máxima aproximación, y puede alcanzar valores de hasta 900 m s^{-1} para distancias cenitales de $z \approx 80^\circ$. El término $d\varrho_k^i$ puede interpretarse como el error en la distancia ϱ_k^i que se produce al asumir un error $d\delta_k$ en la sincronización

del reloj del receptor con el sistema de tiempo GPS. Con esto, se puede concluir que el error $|d\varrho_k^i|$ en la distancia geométrica ϱ_k^i producido por un error de reloj del receptor $|d\delta_k|$ será menor que 1 mm si el error del reloj del receptor es menor que 1 μ s (Dach *et al.*, 2015).

De todo lo anterior, se perciben varias utilidades que derivan en utilizar diferentes combinaciones de los observables, sus frecuencias, longitudes de onda y diferencias para extraer información útil y más precisa de la respuesta de las señales al medio dispersivo de la ionósfera afectada por la actividad solar. Los errores en las observaciones pueden estar relacionados con las anomalías que se pueden detectar en el análisis de las combinaciones lineales de las ecuaciones vistas previamente.

El uso de combinaciones lineales de observables GNSS en los archivos RINEX tiene sus raíces en la necesidad de mitigar errores y mejorar la precisión en las observaciones satelitales. Estas combinaciones se desarrollaron para abordar las imprecisiones o detección de anomalías en el procesamiento de datos de navegación, como los errores ionosféricos, troposféricos, sesgos de relojes, y otros factores que afectan la precisión de las mediciones.

Combinaciones lineales

Procesamiento de las señales GPS usando combinaciones lineales. A menudo resulta útil formar combinaciones lineales particulares de las mediciones de código y/o fase portadora básica. En el Apéndice I se muestran las más combinaciones más utilizadas.

2.8. Síntesis, Definiciones y Pertinencia

A lo largo de este capítulo se han expuesto de manera básica los fundamentos físicos, técnicos y matemáticos que describen el efecto de la ionósfera sobre las señales satelitales GNSS. Hemos restringido los errores por la simplicidad del estudio, ubicando solamente los más relevantes y para ello los hemos dividido en dos tipos: errores relacionados con la ausencia de datos, y los relacionados con la magnitud o valor.

■ **Errores relacionados con la ausencia de datos.**

GAP. Este tipo de error se modela de forma directa a partir de la geometría satélite-receptor. Se define como la *ausencia de observaciones GNSS en una época determinada, a pesar de que la configuración geométrica indica que debería existir visibilidad y, por tanto, datos válidos*. En otras palabras, todo satélite GNSS que se encuentre dentro del campo de visión del receptor —según su elevación— debe generar observaciones no nulas. Por simplicidad y para evitar ambigüedades, se adopta un umbral mínimo de detección igual a 1: cualquier ausencia de datos en una época donde se espera al menos una observación se clasifica como un *GAP unitario*.

■ **Errores relacionados con la magnitud.**

- **CYCLE-SLIPS.** Los receptores GNSS reciben señales satelitales y, tras un proceso de adquisición y sincronización, realizan un seguimiento continuo de las observaciones en cada frecuencia (L1, L2, L5, etc.). Una vez resuelta la ambigüedad de fase, las observaciones deberían formar una curva suave y coherente en el tiempo. Sin embargo, diversas causas pueden provocar una interrupción momentánea de la sincronía, generando un salto abrupto en la magnitud de la fase registrada. Este fenómeno se conoce como *salto de ciclo* (CYCLE-SLIP). Un *salto de ciclo* en GNSS se define como una discontinuidad abrupta en la medición de fase de portadora, causada por la pérdida temporal de seguimiento del satélite, y se manifiesta como un cambio entero en el número de ciclos medidos (Zhang *et al.*, 2023).

Las causas más comunes de este tipo de error incluyen:

- **Pérdida momentánea de la señal**, debido a obstrucciones físicas, interferencias o condiciones atmosféricas adversas.
- **Tormentas geomagnéticas e irregularidades ionosféricas**, como burbujas de plasma o fluctuaciones severas en la densidad electrónica.
- **Cambios en la geometría satélite-receptor**, incluyendo variaciones orbitales, rotación del satélite o fallos en su funcionamiento.
- **Errores del receptor**, como ruido térmico, reinicios inesperados o desplazamientos de la antena.

- **OUTLIERS.** Un *outlier* o punto atípico se define como una observación que se desvía significativamente del comportamiento esperado o del modelo ajustado, y que no puede explicarse por errores aleatorios normales ni por fenómenos físicos conocidos. Se les considera una condición anómala que distorsiona los análisis, por lo que se debe manejar adecuadamente en el tema del posicionamiento (Zhang *et al.*, 2023).

Pueden surgir como:

- Errores de multi trayectoria.
- Interferencias electromagnéticas.
- Problemas del receptor.
- Condiciones atmosféricas extremas.
- Errores de salto de ciclo no detectados.

La relevancia de estos errores para el presente trabajo radica en que su **frecuencia de ocurrencia y distribución temporal** pudieran estar sistemáticamente relacionadas con factores ionosféricos, geomagnéticos y geométricos. Específicamente, se ha planteado como hipótesis central de este trabajo que la tasa de aparición de *CYCLE-SLIPS* y *GAPS* presenta patrones diurnos que reflejan, en parte, la dinámica ionosférica local y el estado del clima espacial.

En términos metodológicos, esto implica que el análisis cuantitativo de estos errores puede proporcionar información valiosa sobre: (a) la contribución relativa de la ionósfera frente a factores locales o instrumentales, (b) la dependencia de estos fenómenos con variables como la elevación satelital, el azimut y la hora local, y (c) la correlación entre la actividad solar-geomagnética y la degradación observada en la calidad de las señales GNSS.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Selección y Preparación de los Datos

La selección de las estaciones se realizó tomando en cuenta la posición geomagnética de las estaciones para lograr tener una cobertura espacial lo más completa posible sobre Latinoamérica. Los datos de las estaciones seleccionadas fueron obtenidos de:

- (NASA, 2024): <https://www.earthdata.nasa.gov/data/space-geodesy-techniques/gnss/data-products-holdings>
- (GAGE *et al.*, 2025): <https://www.unavco.org/data/gps-gnss/gps-gnss.html>
- (IBGE): <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html>
- (Piñón *et al.*, 2018): <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>

A continuación se detalla el proceso seguido para la obtención y análisis de datos.

3.1.1. Selección de las estaciones para el estudio

Klobuchar (1987) menciona que “Dado que el TEC se ordena mejor en coordenadas geomagnéticas, en lugar de geodésicas, también se requiere una conversión a latitud geomagnética”, debido a esta razón se decidió usar coordenadas de inclinación magnética para las estaciones elegidas para el estudio. Los criterios para la elección de las estaciones fueron los siguientes:

1. Estaciones con una distribución uniforme, con inclinaciones magnéticas alrededor de: 60° , 40° , 20° , 0° , -20° , -40° y -60° . Este criterio estuvo constreñido a estaciones ubicadas en Latinoamérica (ver mapa 3.1).
2. Estaciones que tuvieran más del 95 % de datos GPS registrados de los años: 2020, 2022 y 2024, en el Apéndice G se exponen las fechas usadas para este trabajo.
3. Estaciones que tuvieran datos de navegación de los satélites GPS durante esos mismos años. No se tomó en cuenta la marca, ni modelo del receptor de las estaciones, pero sí se revisaron los mantenimientos y la serie de tiempo del funcionamiento de cada una.
4. Estaciones con cadencias entre 15 y 30 segundos.
5. Estaciones que contaran con archivos RINEX de la versión 2.11 y abarcaran las 24 horas de todas las fechas contempladas en el estudio.

Se seleccionaron siete estaciones GPS distribuidas a lo largo de Latinoamérica, ubicadas de manera estratégica, próximas a las líneas de inclinación magnética 60° , 40° , 20° , 0° , -20° , -40° y -60° (basado en el modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) 2022), ver mapa 3.1. Estas ubicaciones aseguran un muestreo adecuado de las distintas condiciones geomagnéticas y permiten evaluar la variabilidad latitudinal en la ocurrencia de errores GNSS. Las estaciones seleccionadas son: PTEX, MANA, QUI3, APMA, TOPL, POAL, MBIO respectivamente. Su posición puede ser cotejada en el siguiente mapa: Figura 3.1, y las localidades están representadas en las siguientes imágenes: Figura 3.3. Las estaciones elegidas se pueden ver en la tabla 3.1 donde viene su nombre

abreviado (4 letras), su latitud y longitud geográfica, su país y la organización que la sustenta. Sus localizaciones geográficas son visibles en los gráficos de 3.3

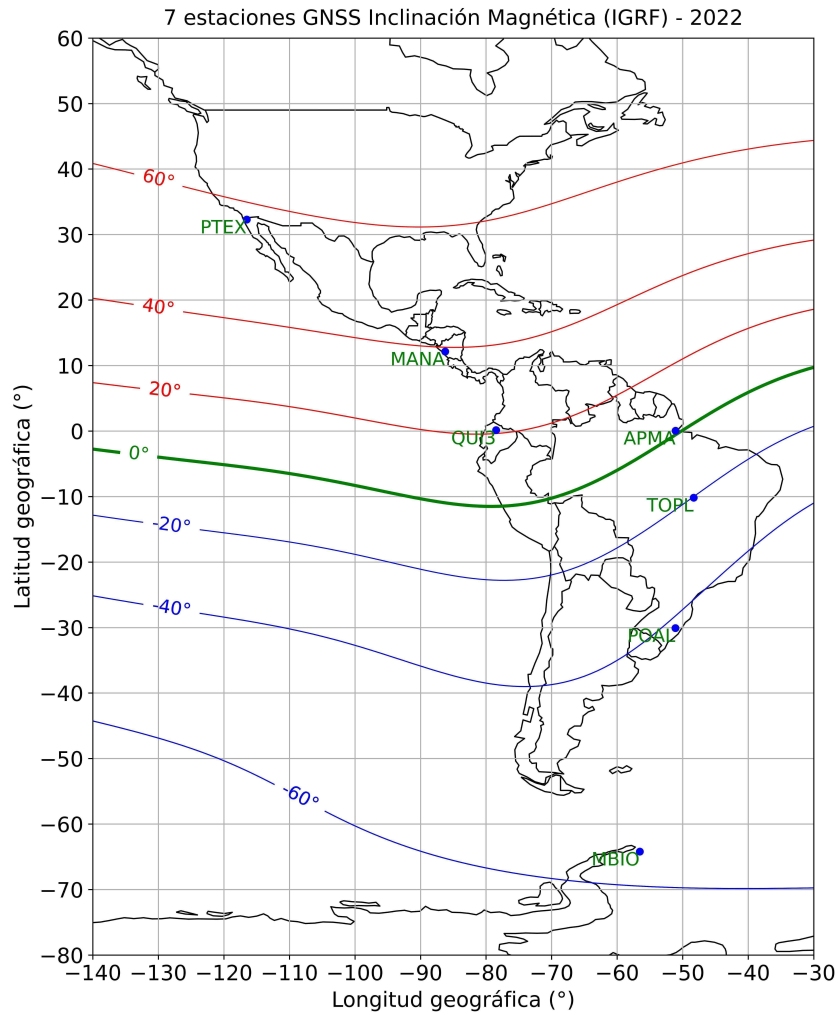


Figura 3.1: Estaciones GNSS seleccionadas para este estudio. Las líneas de colores indican la inclinación magnética basada en el modelo IGRF-2022.

3.1.2. Periodo de estudio

La elección de los años trata de responder la pregunta ¿qué influencia ha tenido en la actividad solar sobre los errores del GNSS durante el ciclo solar 25? Para ello se eligieron tres periodos: 1) año 2020, correspondiente a actividad solar mínima (fase

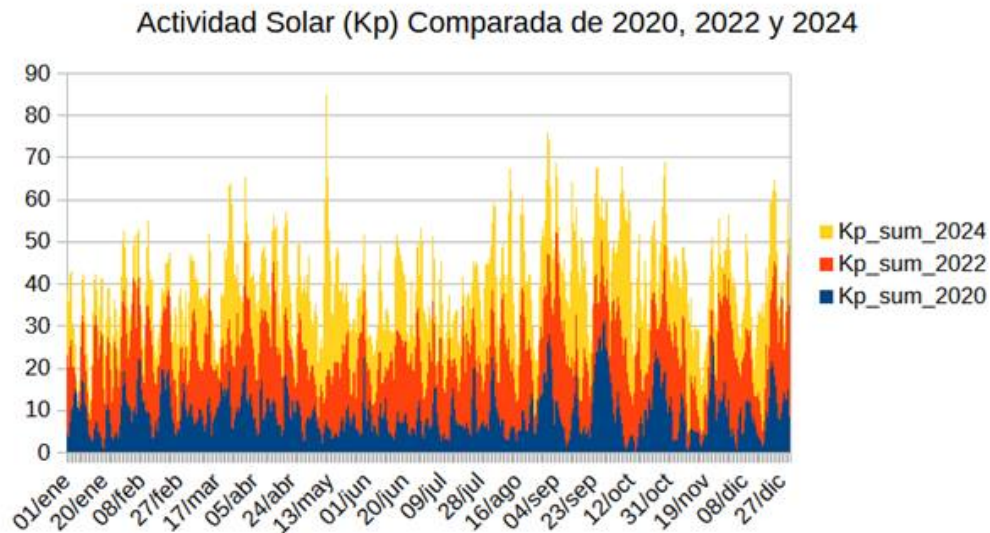


Figura 3.2: Comparación del índice K_p registrado en 2020, 2022 y 2024. De acuerdo a este índice, la actividad más intensa se registró en 2024, que corresponde a una fase cercana al máximo de actividad del ciclo solar 25.

Nombre	Lat. Geog.	Long. Geog.	País	Organización
PTEX	32.2884	-116.5212	México	NASA/UNAVCO/IGS
MANA	12.1489	-86.2490	Nicaragua	INETER/IGS/ITRF
QUI3	0.1396	-78.4728	Ecuador	IGS/ITRF
APMA	0.04704	-51.0971	Brasil	IBGE/ITRF
TOPL	-10.1711	-48.3307	Brasil	IBGE/IGS/ITRF
POAL	-30.0740	-51.1198	Brasil	IBGE/IGS/ITRF
MBIO	-64.2111	-56.543	Argentina	RAMSAC/ITRF

Cuadro 3.1: Estaciones GPS seleccionadas para este estudio.

mínima); 2) año 2022, con actividad solar moderada (fase ascendente); y 3) año 2024, con actividad solar intensa (fase cercana al máximo). La Figura 3.2 muestra la gráfica del índice geomagnético K_p a lo largo de los tres años: 2020 (azul), 2022 (naranja) y 2024 (amarillo). Este índice es global y ayuda a cuantificar el nivel de perturbación que sufre el campo magnético terrestre a consecuencia de las tormentas geomagnéticas World Data Center for Geomagnetism (2025). En esta comparación se puede apreciar de manera clara los cambios en la intensidad de actividad solar en esos tres años.

El objetivo de este trabajo se centró en realizar un análisis detallado de los *errores GNSS* y cómo estos pueden estar influenciados por la actividad solar y la posición de los receptores GNSS seleccionados. Dentro de estos años se seleccionaron fechas específicas

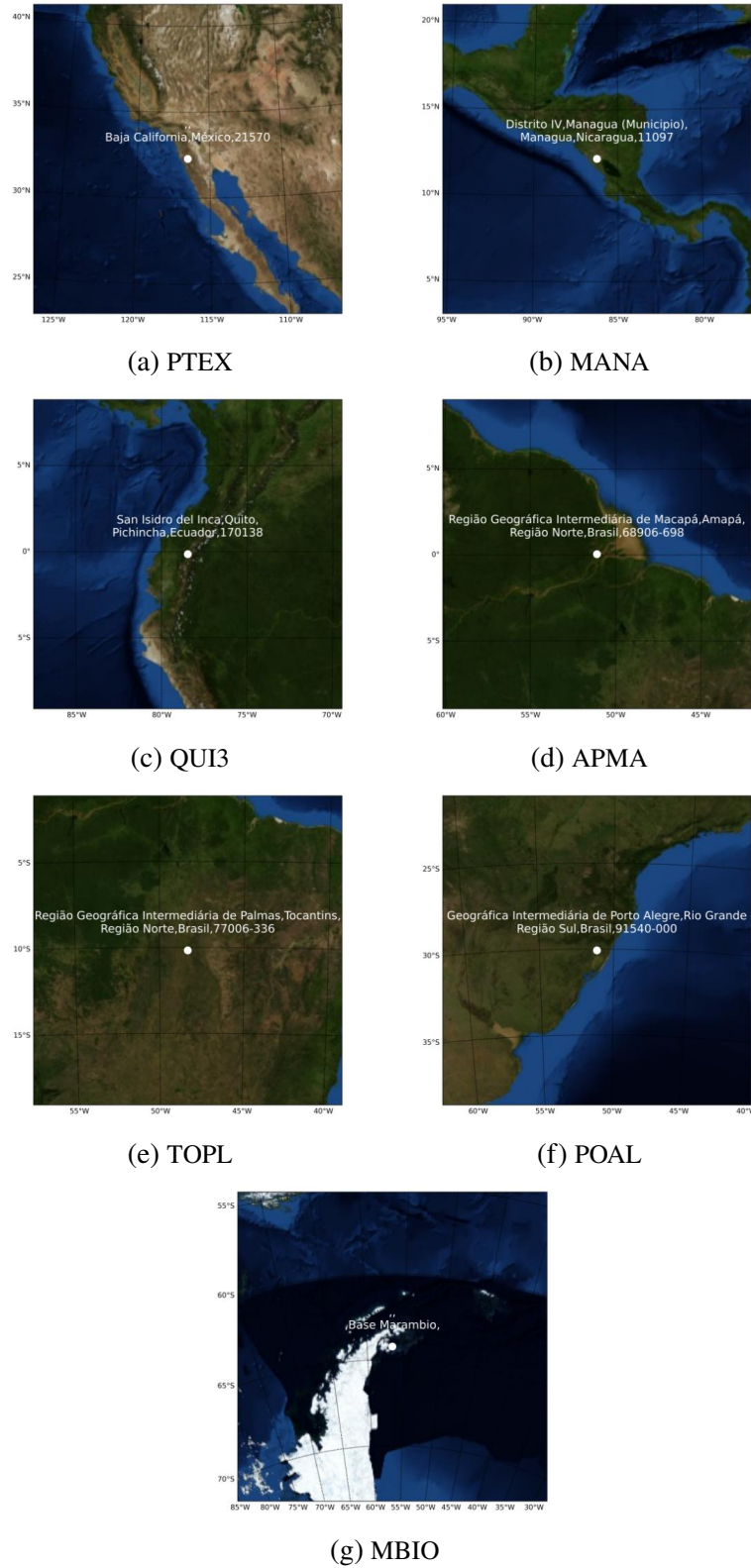


Figura 3.3: Mapas locales de las estaciones. Mapas realizados en Python con la librería “Basemap” por el autor.

cuya actividad solar fuera significativa. Para ello se eligieron 10 días de cada mes, 5 de los cuales con un valor de $K_p < 24$ y los otros 5 días $K_p > 24$, siendo K_p el índice acumulado del día. Las fechas de actividad solar alta y baja fueron basadas en los índices proporcionados por el sitio: World Data Center for Geomagnetism (2025).

3.2. Procesamiento de los Datos

Tipos y Origen de los Datos

Se utilizaron los siguientes archivos para cada estación y día seleccionado:

- **Archivos RINEX de observación** De cada receptor y fecha seleccionados. El formato estandarizado RINEX, garantiza interoperatividad y compatibilidad de los múltiples sistemas.
- **Archivos SP3:** Órbitas precisas proporcionadas por la NASA y redes internacionales GNSS. Los archivos SP3 de órbitas precisas de los satélites fueron descargados de (NASA, 2024), se agradece la oportuna y valiosa información.

La descarga de archivos se realizó de distintos servidores, como se indica en la tabla 3.1, y se realizó un programa automático en Python para la descarga automatizada de cada uno de ellos. El volumen de archivos, considerando que se trató de 3 años, 120 fechas por año, un archivo por estación por día, eso significa 2,520 archivos. Agradecemos a los repositorios de donde se realizaron las descargas para cada estación:

1. PTEX (GAGE *et al.*, 2025)
2. MANA (GAGE *et al.*, 2025)
3. QUI3 (GAGE *et al.*, 2025)
4. APMA (IBGE)
5. TOPL (IBGE)

6. POAL (IBGE)

7. MBIO (Piñón *et al.*, 2018)

Los archivos RINEX y SP3

Con la posibilidad de tener mayor control con el manejo de los archivos y la aplicación de algoritmos personalizados, decidimos realizar el proceso de la lectura de los archivos de forma manual a través de Python. Esto nos dio mucha capacidad para el formato de archivos que usamos para realizar los cálculos y gráficos. Sin embargo, decidimos aprovechar las capacidades computacionales de librerías de Python de bajo nivel para el procesamiento de matrices y operaciones estadísticas como lo son Pandas, NumPy y SciPy principalmente.

Este mismo proceso se realizó con los archivos SP3 que se descargaron para las mismas fechas de los archivos RINEX para tener en cuenta las posiciones de todos los satélites en su órbita cada 5 minutos para verificarlo con las observaciones de los RINEX. Una vez abierta una fecha con sus 7 archivos RINEX (uno por cada estación) y el archivo SP3 correspondiente, se procedió a procesarlos. Convertidos como datagrama (DataFrame) de Pandas fue relativamente sencillo sincronizarlos temporalmente. Aquí describimos el proceso:

1. Obtener los datagramas de Pandas de ambos archivos.
2. Eliminar los datos de satélites no requeridos para este estudio, solamente se usaron satélites de la constelación GPS.
3. Interpolación de los archivos SP3 de 5 minutos a 15 segundos, en todos los casos se usó el método lineal.
4. Ajustar los arreglos. Los huecos de datos o datos nulos se mantuvieron, ya que son parte del estudio.
5. Conversión de coordenadas geocéntricas *Earth-Centered, Earth-Fixed* (ECEF) de los satélites a *East-North-Up* (ENU), para cambiar la perspectiva del centro de la Tierra al observador (en este caso cada estación o receptor).

6. Calcular la elevación y el azimut del satélite visto por la estación GNSS. Este cálculo se realizó separando virtualmente en cada fecha del experimento: el eje temporal, la estación, cada satélite y sus observables, y su elevación respectiva. Todos los datagramas se fusionan en un solo datagrama y crean un datagrama máster para una fecha y ese se guardó como Comma-Separated Values (CSV). Este proceso se realizó con todas las fechas descargadas y se obtuvieron 360 archivos CSV. con los que se trabajó.

3.3. Detección y Clasificación de Errores

Como ya se mencionó, los efectos de la actividad solar sobre la ionósfera pueden causar cambios en las medidas o aproximaciones de los dispositivos de posicionamiento global, principalmente debido a la cantidad de electrones libres, medida a través del Contenido Total de Electrones (TEC). Aunado a estos, el sistema GPS puede presentar errores asociados al funcionamiento y localización de la estación, mismos que deben considerarse para mejorar la precisión en la estimación del TEC (Klobuchar, 1996). Por ejemplo, los archivos RINEX pueden presentar saltos de ciclo observados como una discontinuidad producida por una pérdida temporal de *lock* o conexión segura con el receptor, que provoca una indeterminación de la ambigüedad entera y requiere detección y reparación para recuperar soluciones precisas (Kim *et al.*, 2014; Gurtner, 2009). El algoritmo para su detección se basó en el trabajo de Fujita *et al.* (2013) en el que se utilizaron diferencias temporales de la fase portadora y realiza pruebas estadísticas sobre los residuos para detectar saltos de ciclo. Los pasos que se realizaron para este cálculo son:

1. **Derivada.** Se obtienen las diferencias temporales término a término en L1 y L2.
2. **Suavizado.** Se utilizó una media móvil centrada para generar una curva local sin saltos.
3. **Discontinuidad.** Se calcula la diferencia entre la derivada real y la suavizada. En Python tenemos $ruptura = |dL1 - dL1_smooth|$ para capturar los posibles saltos de ciclo.

4. **Detección estadística.** Basados en un rango IQR estándar, sin asumir una distribución normal de los datos determinamos los puntos fuera de la tendencia local. En Python $ruptura > q3 + 1.5 * IQR$. No nos internamos en el cálculo de la magnitud del deslizamiento o *slip*, ya que solamente nos interesan los puntos donde ocurren los *CYCLE-SLIPS*.

3.4. Análisis Estadístico

- Análisis estadístico de frecuencias de errores en intervalos específicos, óptimos para mostrar claridad en los datos cruzadas con variables explicativas.
 - Latitud Geomagnética. Las 7 estaciones GNSS elegidas para esta investigación representan aproximadamente 7 posiciones específicas respecto a la inclinación magnética. Éstas son: PTEX (60°), MANA (40°), QUI3 (20°), APMA (0°), TOPL (−20°), POAL (−40°), MBIO (−60°). Todas ellas en Latinoamérica.
 - Hora Local. En la mayoría de las gráficas se presenta la hora trasladada a la estación GNSS con la finalidad de tener una equivalencia de condiciones de tiempo y posición de los satélites y así hacer coincidir los errores GNSS detectados con condiciones similares. Los errores GNSS se cuantifican en 24 períodos de una hora, de 0 a 23 donde 0 significan los errores desde las 0 horas a la 1 hora (tiempo local) (sin incluir), y así hasta las 23 horas (tiempo local) hasta las 23:59:59 tiempo local.
 - Fechas de baja actividad solar y alta. De las 10 fechas por mes seleccionadas, 5 fueron con Kp diario mayor a 24 y otras 5 con Kp menor a 24. Tomadas de la World Data Center for Geomagnetism (2025) permite tener el 50 % de las fechas de todo el estudio con actividad solar considerada activa contra otro 50 % considerada en calma.
 - Elevación. Es el ángulo de elevación sobre el horizonte en grados de cada satélite, extraído del archivo tipo SP3 descargado de la NASA y sincronizado con el archivo RINEX correspondiente a la fecha dada y localización geográfica de la estación. Los datos del archivo de navegación vienen en un intervalo de 5

minutos, son interpolados y extrapolados al intervalo mínimo de los archivos RINEX, que es de 15 segundos. La interpolación es lineal y se agrupan en intervalos de 5° desde 0° hasta 90° .

- Azimut. Es el ángulo en grados de posicionamiento de los satélites tomado a partir del Norte, en el sentido horario visto hacia el suelo. Se establecieron intervalos de 15° desde 0° hasta 360° (sin incluir).

Capítulo 4

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de los Errores GNSS, los cuales permiten evaluar la relación entre los *CYCLE-SLIPS*, *GAPS* y *OUTLIERS* el estudio de la ionósfera, pero principalmente con la actividad solar. Estos hallazgos se discuten en relación con los objetivos planteados y con estudios previos, y también destacando tanto las coincidencias como las discrepancias que esperamos enriquezcan la comprensión de estos fenómenos.

Nuestro problema de investigación aborda la variabilidad de la ionósfera como un fenómeno multifactorial, y se decidió trabajar en estos errores GNSS mencionados antes que se considerarán como variables dependientes. Nos interesa saber su comportamiento debido a los distintos contextos en el campo de la física de señales a través del plasma ionosférico. Por otro lado, se consideran como variables independientes la actividad solar, factores geográficos y geomagnéticos (incluyendo la hora local), así como las posiciones satelitales. Objetivo: identificar su influencia en las señales diferenciada sobre dichos errores.

Para esto el análisis de los archivos RINEX se centró en el análisis de los errores en las columnas L1 y L2, las fases, con el propósito de caracterizar y cuantificar los tipos de errores presentes en las señales del GNSS detectadas en las distintas latitudes geomagnéticas representadas por las estaciones PTEX (+60°), MANA (+40°), QUI3 (+20°), APMA (0°), TOPL (-20°), POAL (-40°) y MBIO (-60°) para los años 2020, 2022 y 2024 en 360

fechas distribuidas 10 por cada mes, 50 % con la suma Kp mayor que 24 y el resto con un Kp <24. Y para esto, obtuvimos datos suficientes para los diferentes cruzamientos de datos que requirieron los objetivos específicos.

Nuestros objetivos específicos abarcaron:

1. **Hora Local.** Analizar la distribución de errores GNSS cuantificados en función de la **hora local**.
2. **Elevación.** Analizar la relación entre el ángulo de **elevación** satelital y la frecuencia de los errores GNSS.
3. **Azimut.** Analizar la distribución direccional de errores GNSS en función del **azimut** satelital.
4. **Caso de Estudio.** Análisis del comportamiento de los errores GNSS durante la tormenta geomagnética de mayo 2024.

GAPS. Durante el desarrollo del software hubo retos que resultaran prácticos para el estudio y lo más genéricos posible, se investigó acerca del umbral necesario para considerar *GAPS* y al respecto podemos afirmar sin duda que son un tema de ausencia de datos, el problema inicial a sortear fue definir ese umbral. En la literatura no encontramos un consenso sobre el valor más óptimo para el umbral de intervalos vacíos para declarar un *GAP*. Ver Tabla 4.1. Muy pocos probaron el criterio de definir un umbral igual a una época, solo encontramos estos casos aislados con Moya Zamora (2022) y Carbonetti y Gende (2018). Sin embargo, el consenso general es de valores mayores a 1 (uno). Pensando en que nuestro objetivo era cuantificar el número de épocas sin datos cuando la elevación del satélite es mayor que cero y hacer un análisis estadístico de los mismos, tener el mayor número de lecturas para este propósito volvería más manejable el problema. Así que definimos el umbral = 1 época (*epoch*). Es decir, una época sin datos se considera *GAP* cuando la línea de visión del satélite al receptor está libre (elevación > 0°), entonces seguimos por ese camino, todas las gráficas resultantes toman eso en cuenta.

OUTLIERS. Este caso es muy específico y para su detección optamos por tomar las desviaciones de la derivada punto a punto comparada con la de una mediana móvil local

Fuente	Valor	Contexto
Criterio varias herramientas GNSS	>60 segundos	TEQC
IGS	>30 minutos	Umbral utilidad de una sesión nula.
Análisis Series Temporales	>5 épocas (consec)	Necesita ser re-inicializada .
GNSS QC	<90 % (del total)	Sesión se marca como baja calidad .

Cuadro 4.1: Valores comunes de umbral usados para definir un GAP GNSS

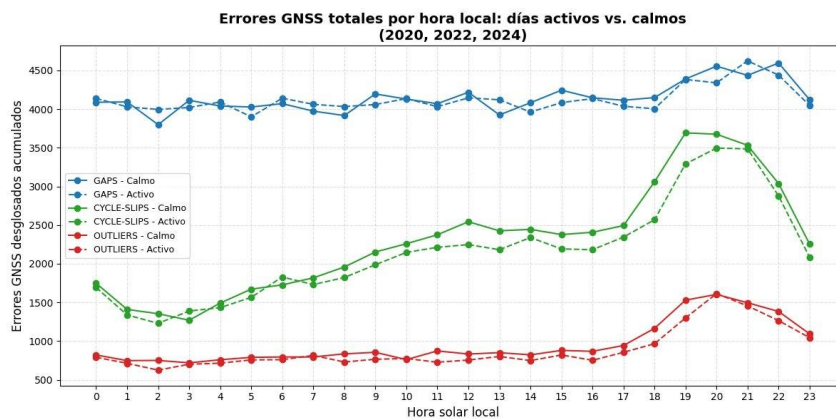


Figura 4.1: Gráfico de los errores separados por tipo: gaps, cycle-slips y outliers acumulados por hora local por los 3 años del estudio. Cada uno dividido según las fechas activa (suma Kp >24) o calma (suma Kp <24).

que muestra una tendencia suavizada, las desviaciones abruptas se interpretan como puntos fuera de tendencia o atípicos, si es que el siguiente punto presenta la aproximadamente la misma derivada pero de signo contrario. Los *OUTLIERS* resultaron ser casos muy raros comparados contra los *CYCLE-SLIPS* y *GAPS*, ya que la gran mayoría de ellos estaban acompañados por varios puntos, ya sea en secuencia o sin tendencia, pero fuera de la curva original. En todo caso, la mayoría podían clasificarse como *CYCLE-SLIPS*. Sin embargo, encontramos que los *OUTLIERS* son una minoría. Ver Figura 4.1. En los primeros gráficos comenzamos a ver el siguiente comportamiento.

Por todo lo anterior las razones por las que se optó por manejar separadamente los *GAPS* y los *CYCLE-SLIPS* fueron: (1) Al tomar los *GAPS* como unitarios se crea una desproporción entre ellos y al sumarlos los *GAPS* ocultan las variaciones de los *CYCLE-*

Año	$N_{GAP}/N_{CYCLE-SLIPS}(L1)$	$N_{GAP}/N_{CYCLE-SLIPS}(L2)$
2020	60.18	69.92
2022	51.05	68.95
2024	39.36	39.97

Cuadro 4.2: Proporción de errores GAPS / SLIPS por año y por banda

SLIPS, ver Tabla 4.2 y (2) lo más importante, al ver los resultados su comportamiento es muy diferente, ver Figura 4.8 y Figura 4.9. Otra prueba de esta diferencia entre el comportamiento de los *GAPS* y los *CYCLE-SLIPS* podemos notar en Figura 4.4 y Figura 4.5 que estos últimos pasaron de no tener lecturas en 2020 a 2022, cuya cantidad de errores *CYCLE-SLIPS* se incrementa por la tarde, hora local de todas las estaciones. Pero lo más notorio es en 2024, cuando el pico vespertino de errores es notoriamente alto. Esto sugiere una conexión con la actividad solar. Este comportamiento ha sido analizado por Geng *et al.* (2021), Luo *et al.* (2017), Magdaleno Torras (2014) y reflejan lo conocido del efecto específicamente en *CYCLE-SLIPS* que presentan esta anomalía vespertina.

4.1. Errores por Hora Local

4.1.1. Totales

Para estas gráficas se omitieron los filtros anuales, latitudinales, la elevación y el azimut, se tomaron todas las fechas descargadas y se contaron los errores separadamente N_{GAPS} y N_{SLIPS} (L1+L2) cada hora local para todas las estaciones y se hizo un gráfico de frecuencias para cada tipo de error *GAPS* y *CYCLE-SLIPS*. Ver Figura 4.2 y Figura 4.3.

4.1.2. Por año

En este caso, para ver el cambio anual, se omitieron la latitud, la elevación y el azimut, se tomaron todas las fechas cada año por separado y se contaron los errores respectivos para todas las estaciones y se realizó el gráfico de frecuencias. En las gráficas se observan los grupos de cada año mostrando la suma de errores por cada hora local del día. Ver *GAPS*

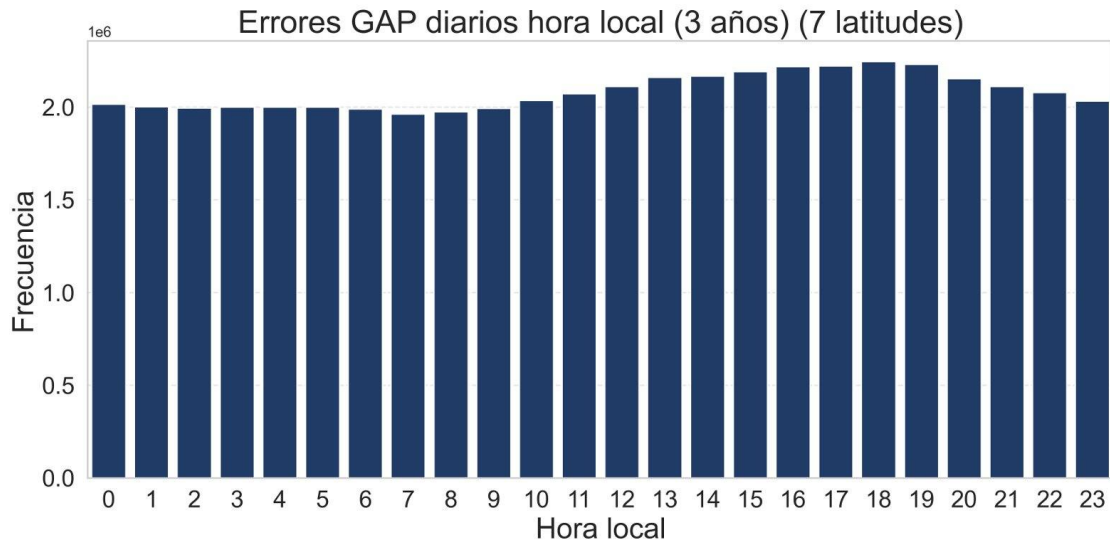


Figura 4.2: Total de Errores *GAPS* por hora local durante los tres años (2020, 2022, 2024) del estudio.

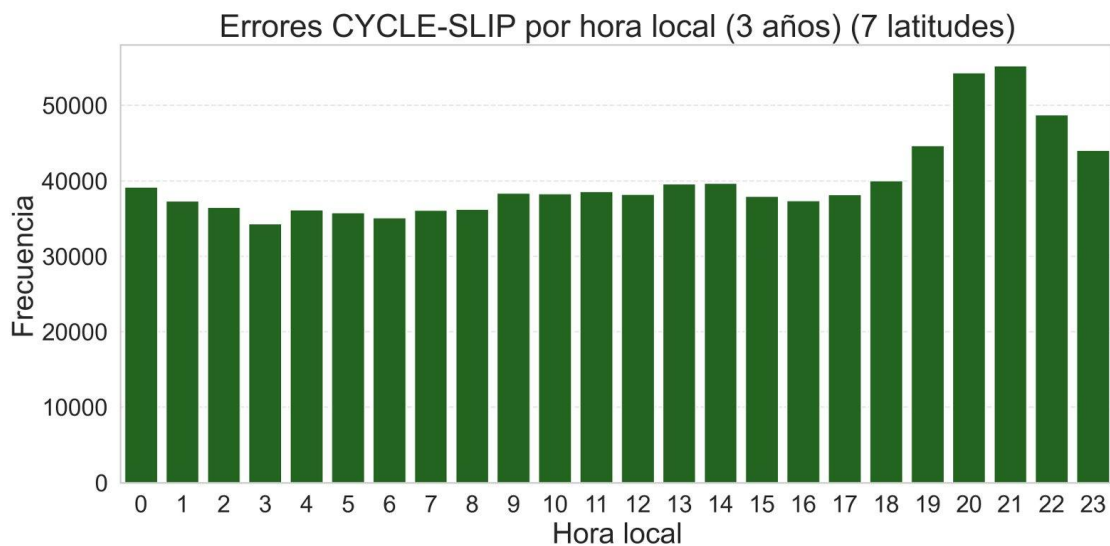


Figura 4.3: Total de Errores *SLIPS* por hora local durante los tres años (2020, 2022, 2024) del estudio.

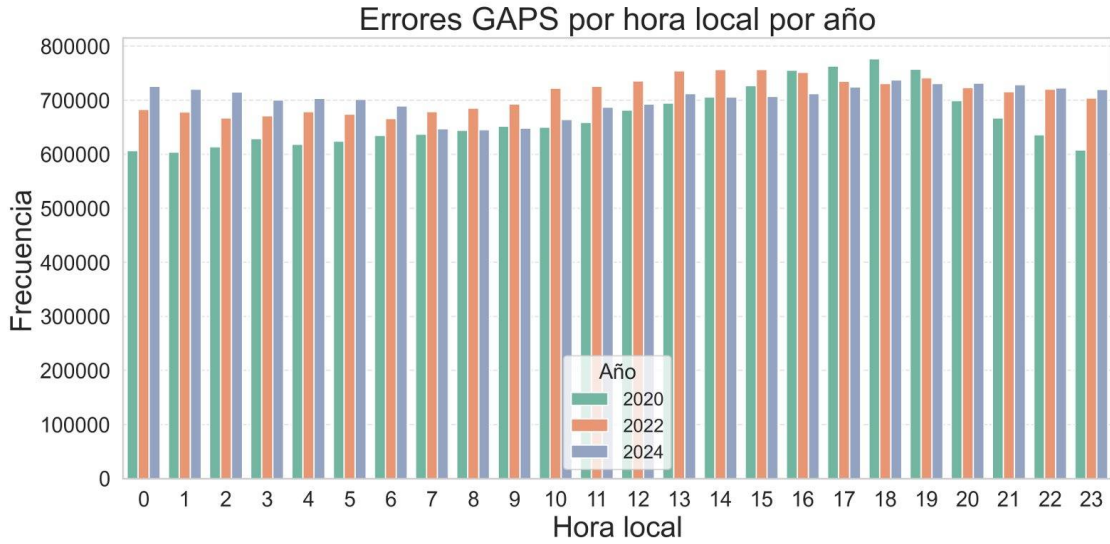


Figura 4.4: Total de Errores *GAPS* por hora local por año (2020, 2022, 2024) del estudio.

Figura 4.4 y *CYCLE-SLIPS* Figura 4.5.

Vale la pena comentar que en este punto se observa una diferencia entre el comportamiento de los *GAPS* y los *CYCLE-SLIPS* notándose que estos últimos tuvieron un aumento vespertino incrementándose año con año. La cantidad de errores *CYCLE-SLIPS* se incrementa por la tarde, hora local de todas las estaciones. Esto sugiere una conexión con la actividad solar. Este comportamiento ha sido analizado por Geng *et al.* (2021), Luo *et al.* (2017), Magdaleno Torras (2014) y reflejan lo conocido del efecto específicamente en *CYCLE-SLIPS* que presentan este comportamiento vespertino. Este resultado refuerza positivamente nuestra hipótesis inicial que indica, en este caso, la influencia del ciclo solar en los *CYCLE-SLIPS*.

4.1.3. Por estación o latitud geomagnética

En este enfoque revisamos el comportamiento de los datos bajo la perspectiva total anual (los 3 años), cada estación o latitud geomagnética separadamente: PTEX (60°), MANA (40°), QUI3 (20°), APMA (0°), TOPL (−20°), POAL (−40°) y MBIO (−60°). Las líneas verticales representan las 24 horas de cada día. Así que tenemos ahora la suma de los errores por tipo, acumulados por hora local en cada estación.

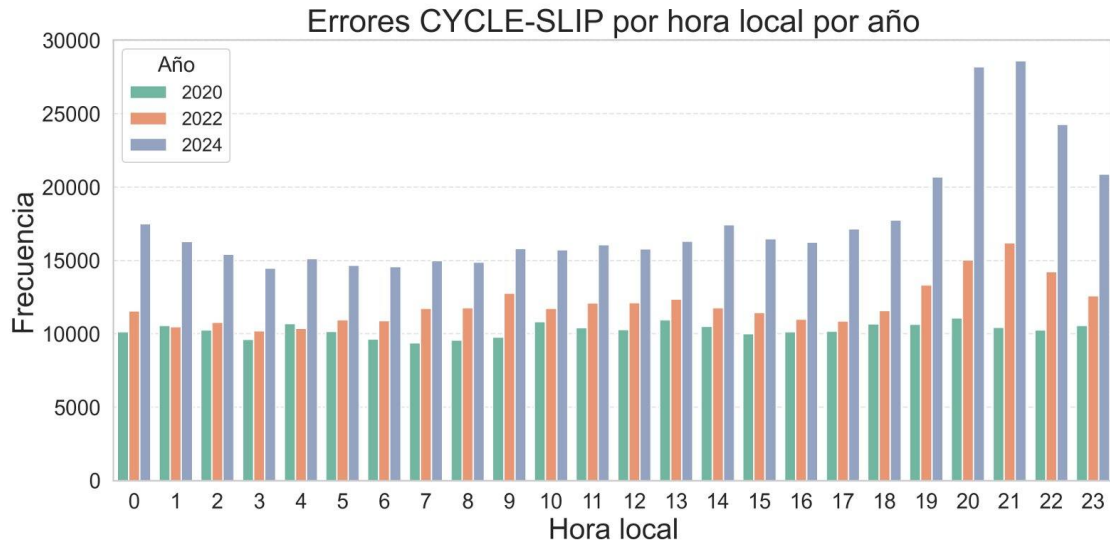


Figura 4.5: Total de Errores *SLIPS* por hora local por cada año (2020, 2022, 2024) del estudio.

La Figura 4.6 y la Figura 4.7, describen el comportamiento de cada estación, se pueden observar las diferentes alturas promedio de cada una, tanto en el caso de los *GAPS* como en el caso de los *CYCLE-SLIPS*.

En el caso de los *CYCLE-SLIPS* también podemos notar que el caso del pico vespertino de errores *CYCLE-SLIP* no se observa en MBIO a -60° y en el caso de QUI3 a 20° , presenta el pico más pronunciado en las últimas horas de cada día. Podríamos notar el parecido del perfil entre QUI3, APMA, TOPL y POAL, mientras que PTEX y MANA tienen un perfil similar y MBIO un perfil plano de errores mínimos.

En el caso de los *GAPS* los perfiles son similares excepto PTEX.

El agrupamiento de perfiles tanto de *GAPS* como de *CYCLE-SLIPS* puede sugerir un patrón relacionado con la inclinación magnética.

4.1.4. Perfiles de errores por hora/año para cada latitud

En esta sección se presentan 14 gráficos relacionados con los errores *CYCLE-SLIPS* y *GAPS* ahora con un desglose anual que permite ver el cambio por año en cada caso. Debido a cuestiones de espacio se presentan en la parte 1 del Apéndice J.

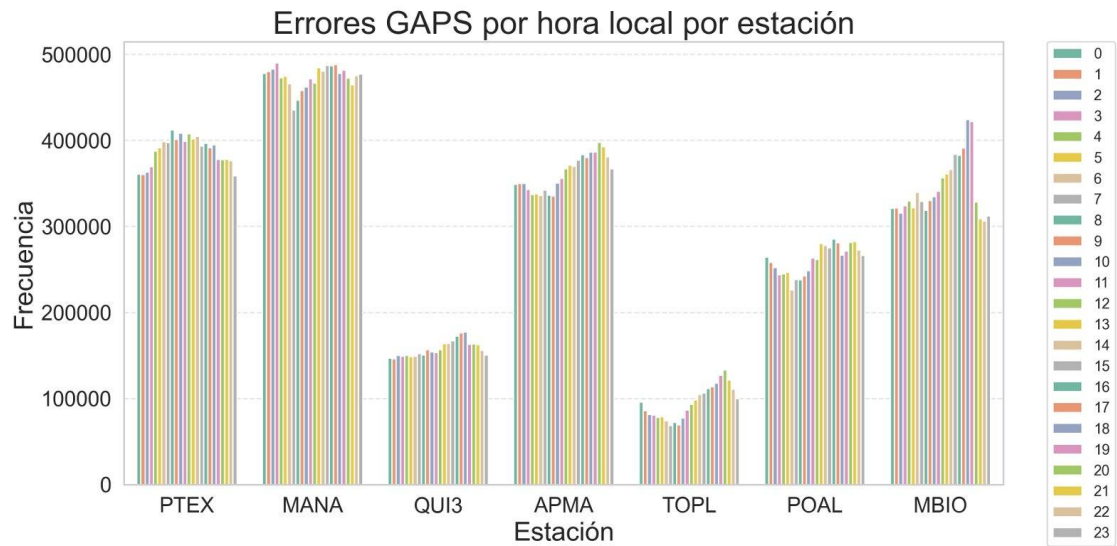


Figura 4.6: Se muestran las 7 estaciones (latitudes) del estudio. Se muestran la totalidad de errores *GAP* acumulados de los 3 años del estudio por hora local.

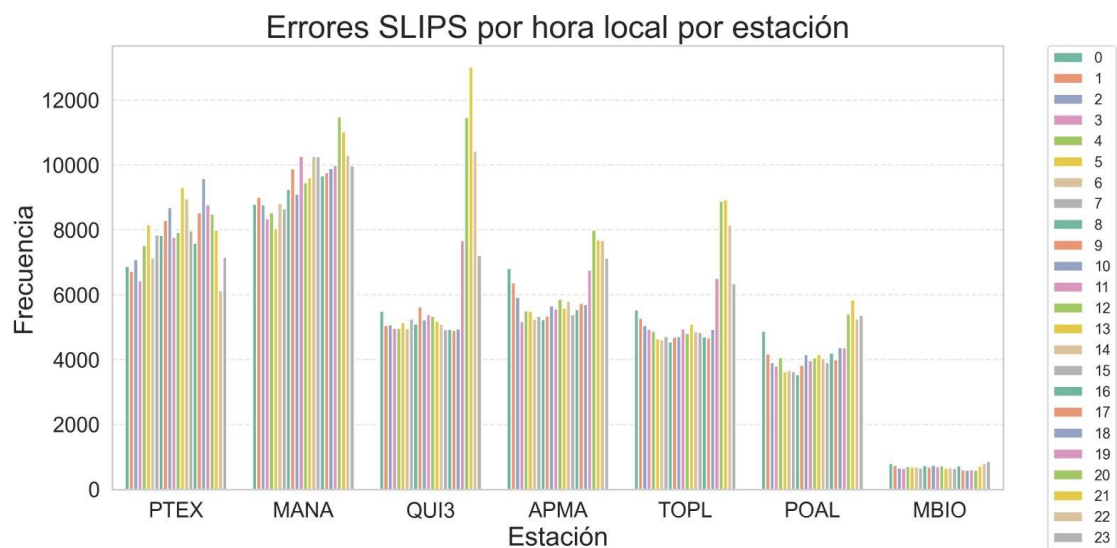


Figura 4.7: Se muestran las 7 estaciones (latitudes) del estudio, los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados de los 3 años del estudio.

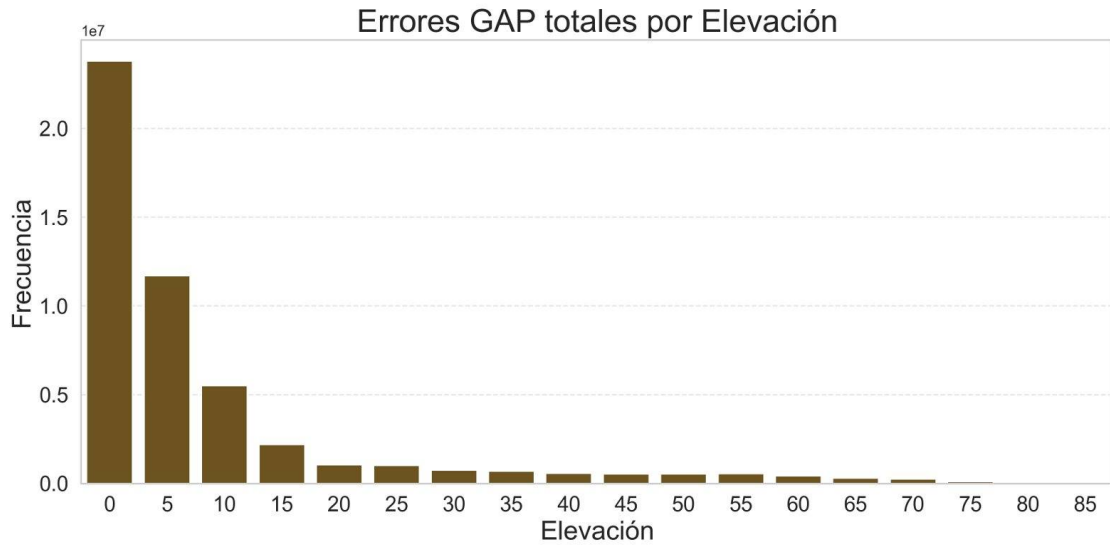


Figura 4.8: Gráfica que muestra el comportamiento de los *GAPS* unitarios totales acumulados de los 3 años del estudio con respecto a la elevación satelital en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°.

El siguiente paso es presentar los perfiles de cada estación por hora local y para esto tenemos 7 gráficos para los *GAPS* y otros 7 para los *CYCLE-SLIPS* uno para cada estación (latitud) con los 3 años separados cada hora. Ver Apéndice K para acceder a los gráficos.

4.2. Errores por Elevación

En esta sección expondremos los gráficos obtenidos al número de errores *GAPS* y *CYCLE-SLIPS* por separado respecto a la elevación de los satélites sobre el horizonte.

4.2.1. Totales

Se omitieron los filtros de la latitud, la hora local y el azimut, se tomaron todas las fechas descargadas y se contaron los errores separadamente N_{GAPS} y N_{SLIPS} (L1+L2) cada intervalo de elevación se tomó de 5° desde 0° hasta 90° para todas las estaciones y se hizo un gráfico de frecuencias. Ver Figura 4.8 y Figura 4.9.

Se puede observar en el caso del gráfico de *GAPS* una tendencia proporcional inversa del tipo $y = kb^{-x}$. Mientras que en el caso de los *CYCLE-SLIPS* una curva muy diferente.

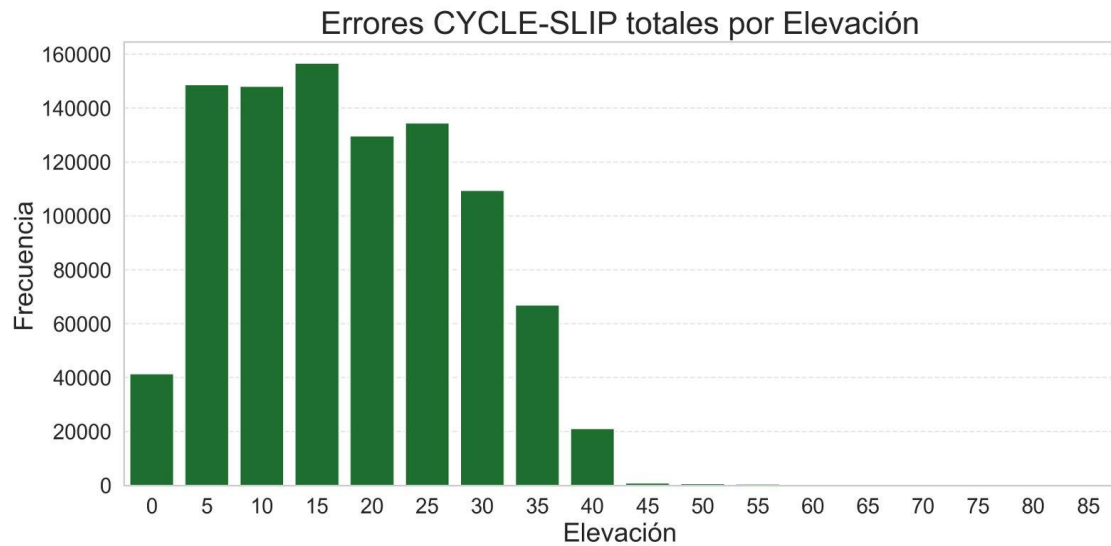


Figura 4.9: Gráfica que muestra el comportamiento de los *CYCLE-SLIPS* totales acumulados de los 3 años del estudio con respecto a la elevación satelital en intervalos de 5° desde 0° hasta 90°.

4.2.2. Por Año

Ahora veremos el comportamiento de los errores contra la elevación en todas las estaciones (latitudes) sin considerar hora local ni azimut ni temporada. Ver Figura 4.10 y Figura 4.11.

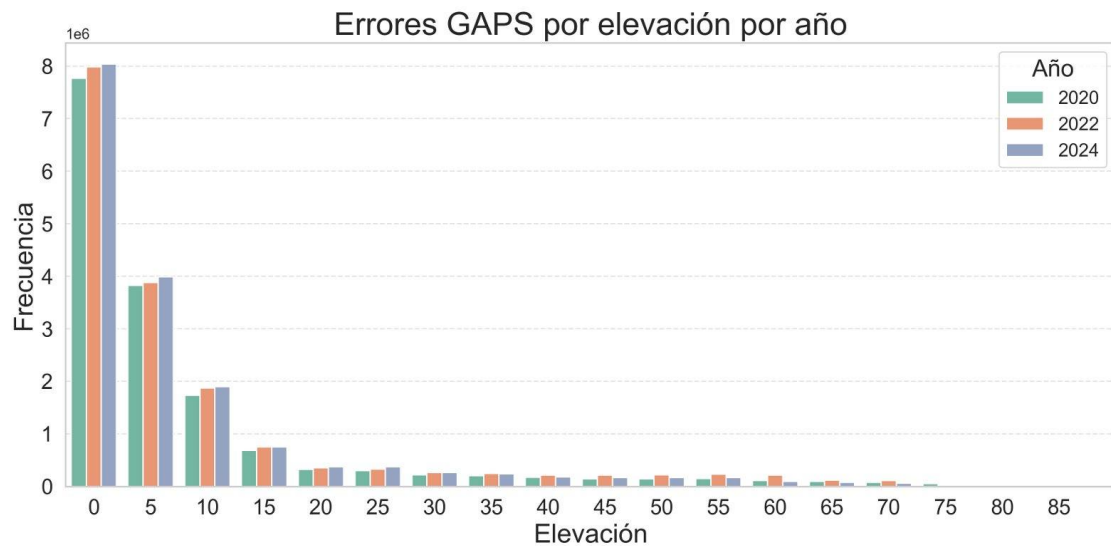


Figura 4.10: Gráfica de los errores GAPS acumulados por año contra la elevación satelital.

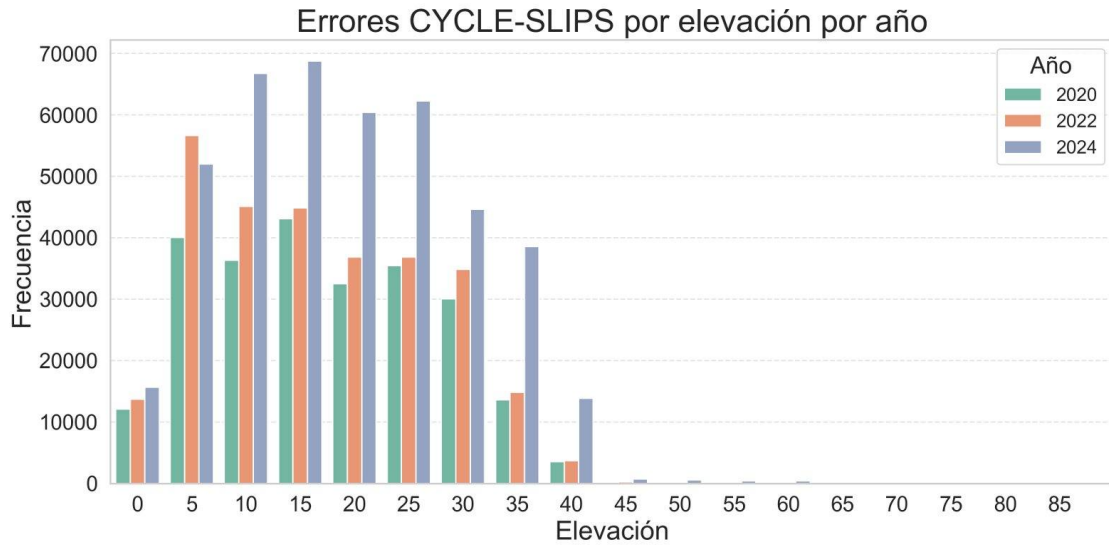


Figura 4.11: Gráfica de los *CYCLE-SLIPS* acumulados por año durante los 3 años del estudio.

4.2.3. Por Latitud

En este caso observamos el comportamiento de los errores contra elevación satelital en las diversas latitudes magnéticas de los receptores, sin considerar la hora local, el azimut, o el año. Ver Figura 4.12 y Figura 4.13.

4.2.4. Perfiles de errores por elevación/año para cada latitud

El análisis de los errores por elevación tomando en cuenta los casos específicos para cada estación/latitud geomagnética se pueden revisar en el Apéndice K.

4.3. Errores por Azimut

A raíz del hallazgo de ese pico vespertino de errores tipo *cycle-slips* nos preguntamos si ese fenómeno no estaba orientado hacia algún punto del horizonte o alineado con el eje terrestre. Así que nos propusimos ver ese comportamiento y encontramos cosas muy interesantes.

Analizamos el perfil azimutal de los *CYCLE-SLIPS* en 2020, 2022 y 2024 por separado

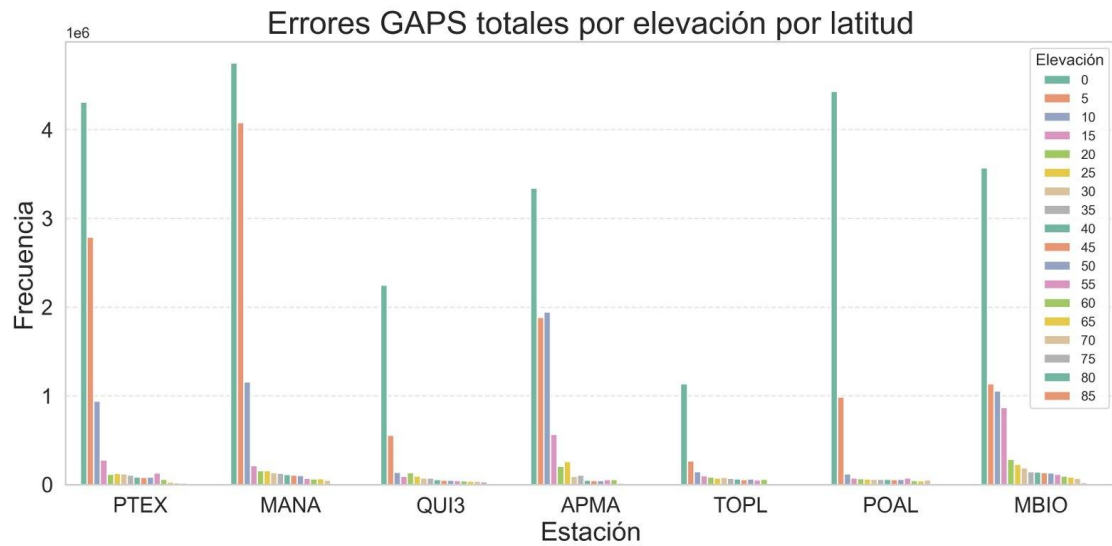


Figura 4.12: Gráfica de los *GAPS* unitarios totales acumulados por los 3 años del estudio de cada estación con respecto a la elevación satelital tomada en intervalos de 5° desde 0° hasta 90° .

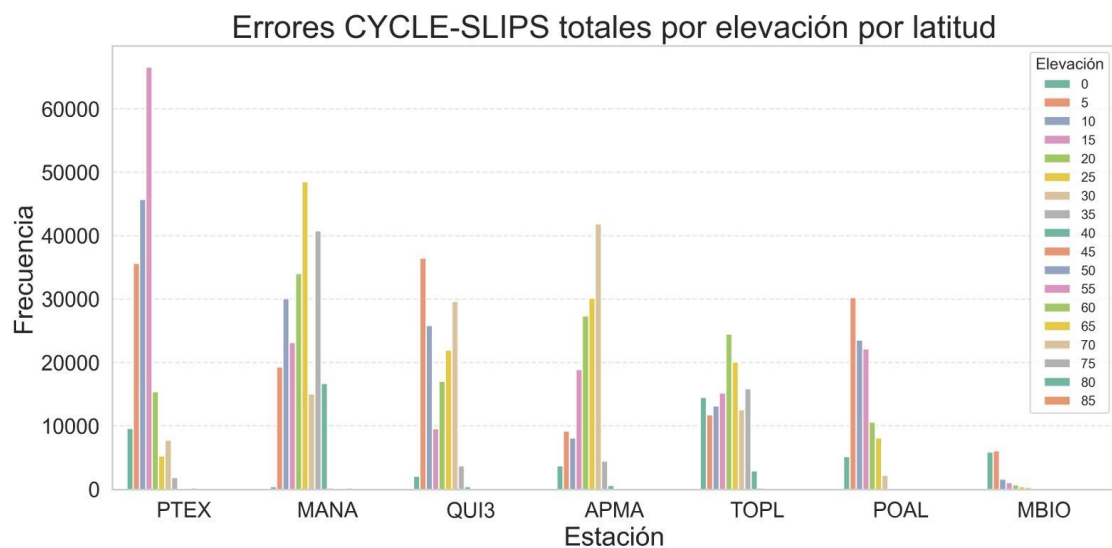


Figura 4.13: Gráfico del los *CYCLE-SLIPS* totales acumulados de las 7 estaciones del estudio los 3 años respecto a la elevación satelital tomada en intervalos de 5° desde 0° hasta 90° .

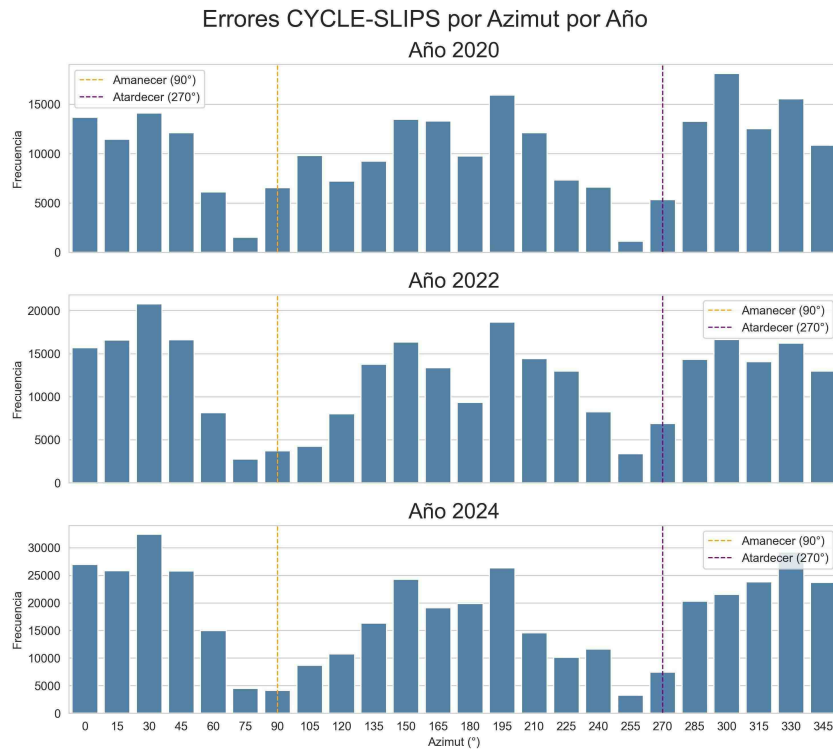


Figura 4.14: Gráfica por año de estudio con los errores tipo *CYCLE-SLIPS* totales por año distribuidos por azimut en ángulos de 15° desde 0° hasta 360° .

y encontramos que hay una tendencia de mínimos de errores tipo *cycle-slips* en un eje muy cercano al Este-Oeste, se conserva durante los tres años del estudio. Debido a que es el resultado de las 7 estaciones, es improbable que se trate de alguna montaña u obstáculo específico, además por los anteriores resultados sabemos que los *CYCLE-SLIPS* tienen más probabilidad de aparecer en elevaciones medias. Ver Figura 4.14. El caso de los *GAPS* también presentó un perfil no muy definido, aunque parecería tener una tendencia opuesta a los *CYCLE-SLIPS*, ver Figura 4.15.

Para indagar más en esto con más detalles obtuvimos un gráfico también por año, pero los meses independientes. Así podemos constatar que el comportamiento lleva la misma tendencia todo el año. Ver Figura 4.16.

También se hicieron gráficos tridimensionales de estos eventos y mostraron patrones más claros. Mostramos el caso de una estación Figura 4.17.

Sin embargo, nos preguntamos si el fenómeno del perfil azimutal estaría relacionado con la cobertura satelital. Para ello dividimos la bóveda celeste en las regiones que tenemos

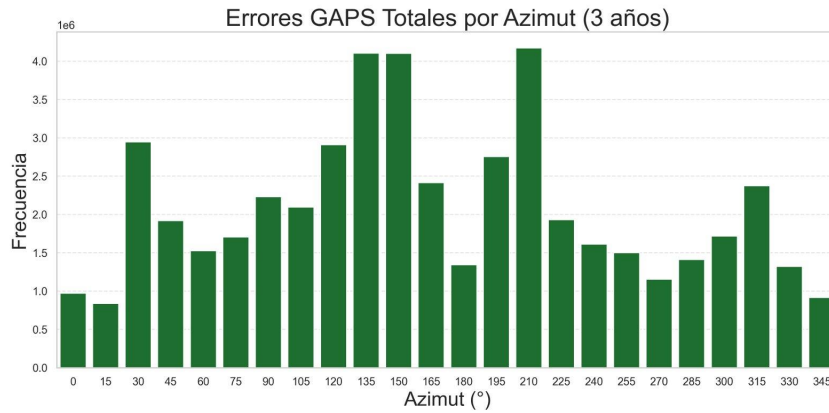


Figura 4.15: Gráfica de los errores tipo *GAPS* acumulados totales durante los tres años del estudio, distribuidos por azimut en ángulos de 15° desde 0° hasta 360°.

como intervalos de frecuencia, en el caso de la elevación tenemos cada 5° y en el caso del azimut cada 15°. La “cuadrícula” en el gráfico polar se evaluó la frecuencia con la que los satélites pasaron por cada una por separado y se graficó un mapa de calor que puede verse en la Figura 4.18. En principio, tenemos resultados contradictorios, ya que hay mínimos en el eje Este-Oeste y ahí hay cobertura satelital, no así en el eje Norte-Sur que tiene vacíos importantes. Se realizaron gráficos de todas las estaciones que participaron en nuestro proyecto. Sin embargo, faltaría verificar esto con estaciones vecinas a las que usamos para poder discriminar efectos locales.

Se obtuvieron muchas gráficas describiendo el fenómeno que hemos estado comentando, incluso videos describiendo la evolución en el tiempo de los 360 días de cada una de las estaciones (en este último caso los videos solo disponibles en línea).

Para el caso de las gráficas de calor de todas las estaciones, en torno al caso azimutal, presentamos todas en el Apéndice L.

4.4. Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024

- Entre el 10 y el 13 de mayo de 2024, la Tierra fue afectada por la tormenta geomagnética más intensa registrada desde 2003, alcanzando un índice Kp (indicador de la

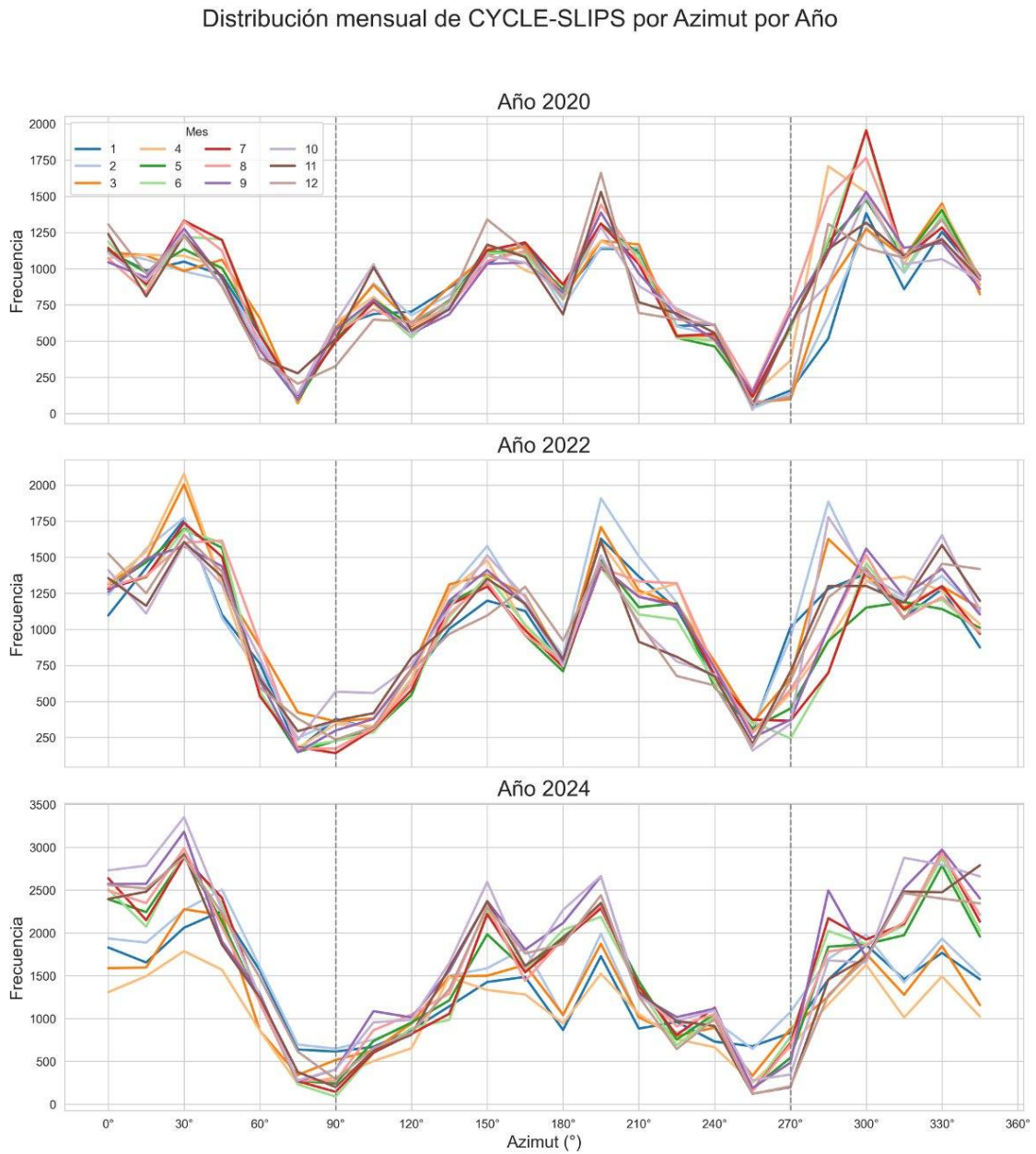


Figura 4.16: Gráfico de la distribución mensual de los errores por azimut por cada año del estudio.

4.4. Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024

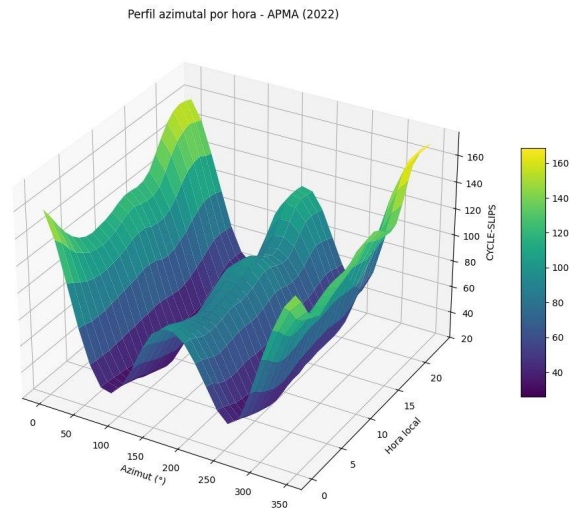


Figura 4.17: Gráfico 3D del el perfil de errores diario por horas, y el perfil del azimut de la estación APMA el año 2022. Se aplicó el suavizado Gaussiano para ver la tendencia más claramente del mismo caso.

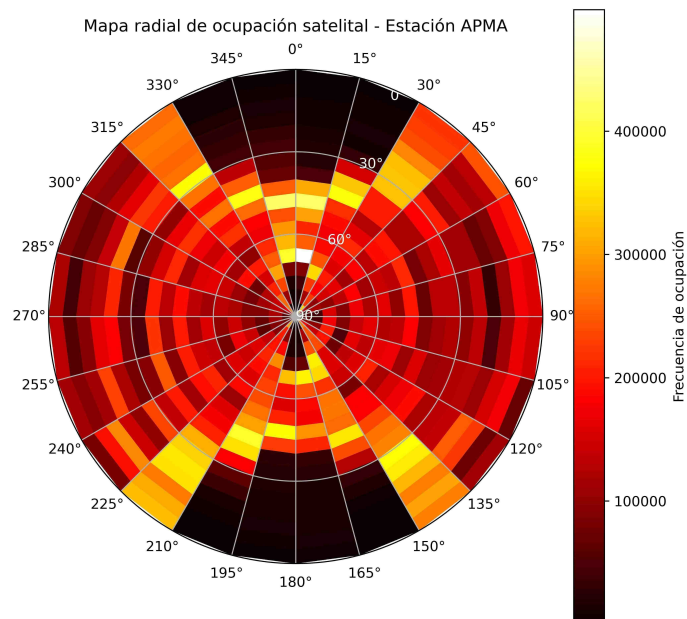


Figura 4.18: Gráfico de la cobertura satelital acumulada por los tres años en la posición de la estación APMA. Cada unidad es una época/coordenada(elevación, azimut).

actividad geomagnética global de la Tierra) de 9 y un pico Dst (mide la variación del campo magnético desde la superficie del anillo de corriente ecuatorial) de -351 nT. Este evento extremo, resultado de múltiples eyecciones de masa coronal (EMC) provenientes de la región activa *AR3664*, tuvo implicaciones significativas sobre todo en la presencia de auroras que se observaron en latitudes del norte de México.

- Este evento fue parte del máximo solar del Ciclo 25. Y nos dio la oportunidad de entender el tipo de afectación de los sistemas GNSS. En este caso, tuvimos la oportunidad de contar con información de los archivos RINEX y otras fuentes sobre la actividad solar, correspondientes a los días previos y durante la mayor parte del evento.
- Las fulguraciones y EMC que se presentaron el día 8, nos dieron oportunidad de hacer pruebas para tratar de entender el efecto en la suma de errores GNSS medibles a través de los métodos antes expuestos. Las noticias de ese día del *SPACE WEATHER* decía: “Se avecina una CME. Fue lanzado al espacio el día de hoy por una serie de explosiones en el dosel magnético de la gigantesca mancha solar *AR3664*”.
- Los días siguientes la intensidad crecía y las noticias se pusieron más alarmantes. El *SPACE WEATHER* decía el día 9: “La alerta de tormenta geomagnética de este fin de semana se ha actualizado de G2 (Moderada) a G4 (Severa). ¿Por qué? Porque la mancha solar gigante *AR3664* sigue lanzando EMC hacia la Tierra. Después de la erupción solar X2.2 de hoy, ahora hay al menos 4 nubes de tormenta que se dirigen hacia nosotros”.
- Complementando la secuencia de sucesos, el día 10 de mayo, la misma fuente publicó: “La primera de las seis EMC lanzadas hacia la Tierra por la mancha solar gigante *AR3664* golpeó hoy el campo magnético de nuestro planeta. El impacto del 10 de mayo a las 16:45UT sacudió los magnetómetros de todo el mundo y provocó una tormenta geomagnética, que ahora es extrema. Más EMC le están siguiendo de cerca y su llegada podría extender la tormenta hasta el fin de semana”.
- El día 11, las noticias continuaron con lo siguiente: “Una EMC golpeó el campo magnético de la Tierra el 10 de mayo, provocando la mayor tormenta geomagnética en más de 20 años, un evento extremo de categoría G5. Ahora está disminuyendo

(actualmente categoría G2), pero no ha terminado. Se espera que más EMC golpeen el campo magnético de la Tierra durante las próximas 24 a 48 horas, y podrían empujar la tormenta a niveles extremos”.

- Lo que sucedió el día 10 de mayo de 2024 se puede ver en los indicadores publicados por la misma fuente, en la siguiente Figura 4.19
- Nosotros lo que hicimos fue tomar las fechas del 7 al 13 de mayo de 2024 y todos los archivos RINEX de las 7 estaciones desde -60° (MBIO) hasta los 60° (PTEX) de inclinación magnética. En una primera aproximación se tomaron los días 7, 8 y 9 catalogados como calmos en actividad solar con una suma diaria menor a los 24 Kp y los días 10, 11 y 12 cuya actividad fue muy alta debido al evento. Se efectuó el conteo de errores totales tanto de los días previos al evento de la fase calma como los de la fase perturbada y se realizó la gráfica de dicho período. Ver Figura 4.20. Esta gráfica representa el comportamiento de los errores totales por elevación satelital. Podemos notar una variación mínima. Sin embargo, al graficar la suma de los días previos, es decir los días calmos distribuidos por hora contra los tres días posteriores activos acumulados por hora vemos un incremento que podría significar el impacto de la masa coronal, ver Figura 4.21. De hecho, reafirma algo interesante, la anomalía vespertina, se activó justamente los tres días activos de tormenta.
- Se analizaron las emisiones de masa coronal de los días previos, sólo las tipo Halo que tenían mayor velocidad, es decir, con energía y dirección para impactar a la Tierra y encontramos coincidencias como las mencionadas por el SPACE WEATHER. Ver Figura 4.22. En esta tabla, la primera columna es una letra de identificación, se tiene la fecha-hora de la eyección coronal, la velocidad, el tiempo estimado de viaje y la fecha-hora de llegada. En esa lista hay dos fechas de arribo que coinciden con una diferencia mínima. Son dos EMC que de diferente velocidad que seguramente coincidieron y muy posiblemente contribuyeron a este fenómeno.
- También se realizó una secuencia de tiempo de los errores separados por tipo: GAPS, CYCLE-SLIPS y OUTLIERS. Y se cotejaron con las letras de las diferentes tormentas de la Figura 4.23. Las marcas verdes corresponden a la emisión de la EMC, las marcas rojas corresponden a la llegada a la Tierra de la misma EMC. La secuencia

reveló que el tipo de error más sensible a este fenómeno son los GAPS unitarios. Las dos coincidencias corresponden de manera muy cercana, la incertidumbre de los datos no permite tener mayor precisión, pero es bastante aproximado.

- Definitivamente creemos que vale la pena extender este estudio de caso con más estaciones y concentrar el esfuerzo en mapear más extensamente el hemisferio norte. Pero, aunque los datos no son concluyentes debido a la falta de datos más extensos y análisis estadísticos apropiados, los gráficos sugieren una conexión entre el arribo del viento solar originado por los EMC más energéticos y de tipo HALO con los errores GNSS de tipo *GAPS*. Las fulguraciones no parecen tener una conexión con los errores GNSS, con los datos y la resolución temporal que se tuvo a disposición. Además, el incremento de los errores fue casi exclusivamente de la estación más meridional, a 60° (PTEX) en la frontera con EE.UU. de inclinación magnética norte, lo cual coincidiría con las auroras boreales que se presentaron.
- El análisis de errores GNSS orientados a *GAPS*, *CYCLE-SLIPS* y *OUTLIERS* parece tener utilidad en la detección de fenómenos del clima espacial. En conjunto, su estudio para la mitigación de errores en apoyo al incremento de la precisión de la estimación del TEC es una herramienta que puede dar frutos muy pronto.

4.4. Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024

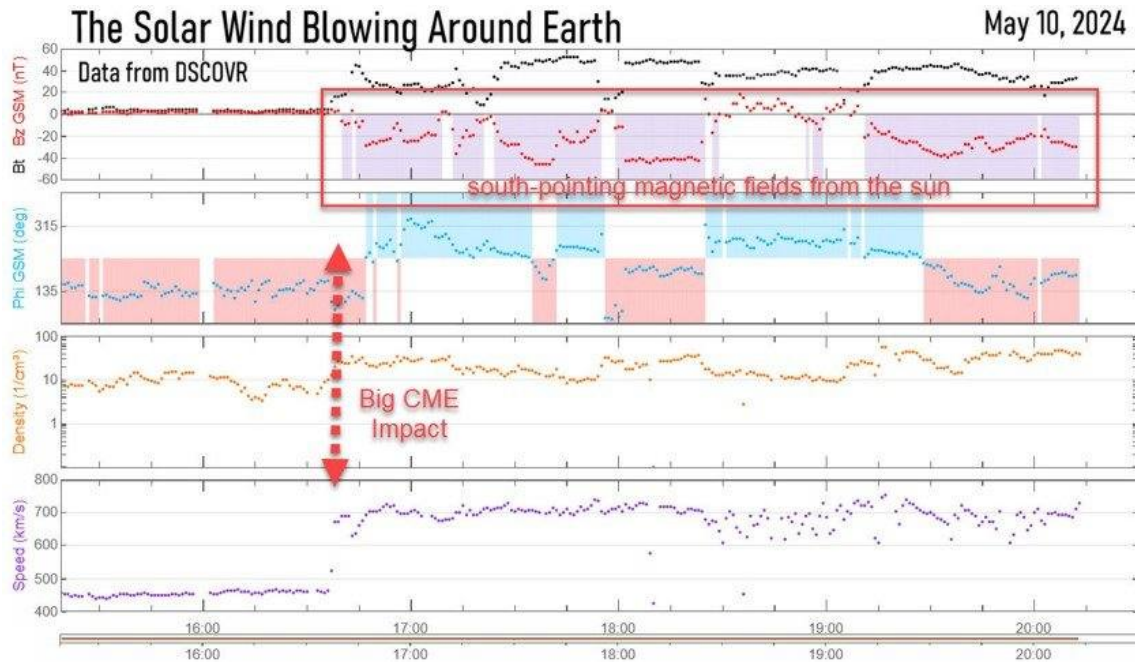


Figura 4.19: Gráfico del comportamiento de los parámetros más importantes del Sol durante la tormenta geomagnética de mayo de 2024. Gráfico obtenido de spaceweather.com.

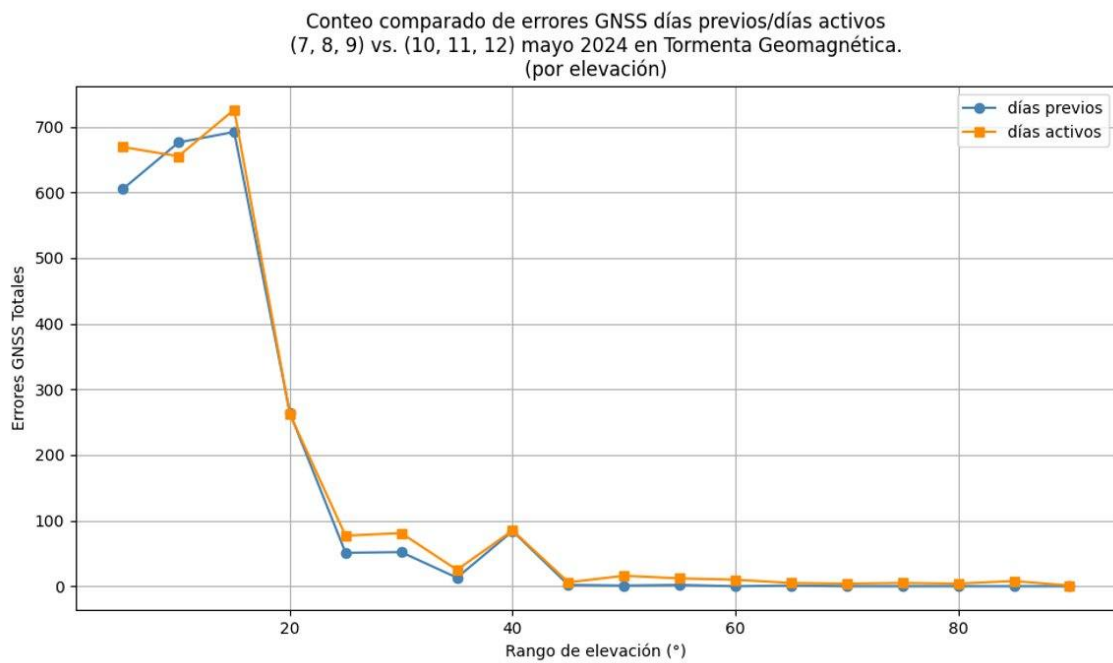


Figura 4.20: Suma acumulada de los errores GNSS en los días previos (azul) / activos (amarillo) relativos a la tormenta geomagnética de mayo 2024, distribuidos por elevación.

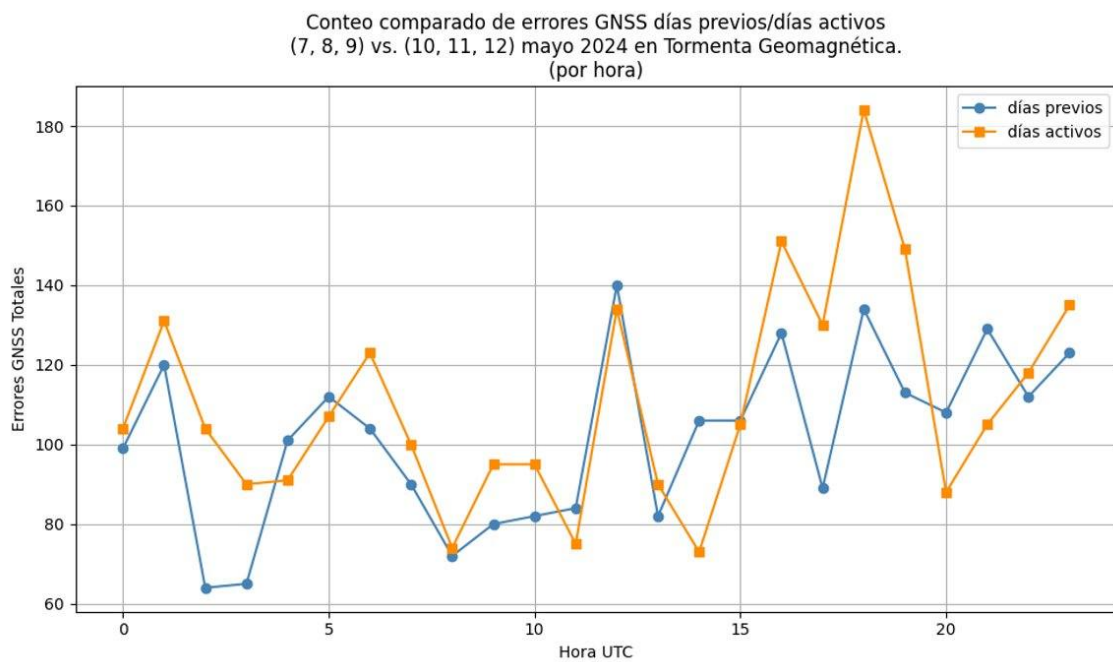


Figura 4.21: Suma acumulada de los errores GNSS en los días previos (azul) / activos (amarillo) relativos a la tormenta geomagnética de mayo 2024, distribuidos por hora UTC.

4.4. Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024

id	Emisión	v km/s	t hr	arribo
a	2024-05-07 02:12:05	812	51.3	2024-05-09 05:30:54
b	2024-05-08 05:36:06	530	78.6	2024-05-11 12:13:05
c	2024-05-08 12:24:05	677	61.5	2024-05-11 01:56:51
d	2024-05-08 22:24:05	952	43.8	2024-05-10 18:10:08
e	2024-05-09 09:24:05	1280	32.6	2024-05-10 17:57:12
f	2024-05-09 12:24:06	563	74.0	2024-05-12 14:24:36
g	2024-05-09 18:52:00	1024	40.7	2024-05-11 11:33:24
h	2024-05-10 07:12:05	953	43.7	2024-05-12 02:55:23
i	2024-05-08 19:24:06	457	91.2	2024-05-12 14:34:34
j	2024-05-10 21:17:42	686	60.7	2024-05-13 10:02:01
k	2024-05-11 01:36:05	1614	25.8	2024-05-12 03:25:02
l	2024-05-11 16:12:05	846	49.3	2024-05-13 17:27:10

Figura 4.22: Tabla con la secuencia de EMC previas. Todas ellas son relevantes, ya que su dirección afecta a la Tierra. Se presenta la fecha y hora UTC de la eyección, su velocidad y el tiempo aproximado de llegada a la Tierra (fecha y hora de llegada). Las fechas de arribo marcadas con negrita y color rojo y azul son dos coincidencias relevantes.

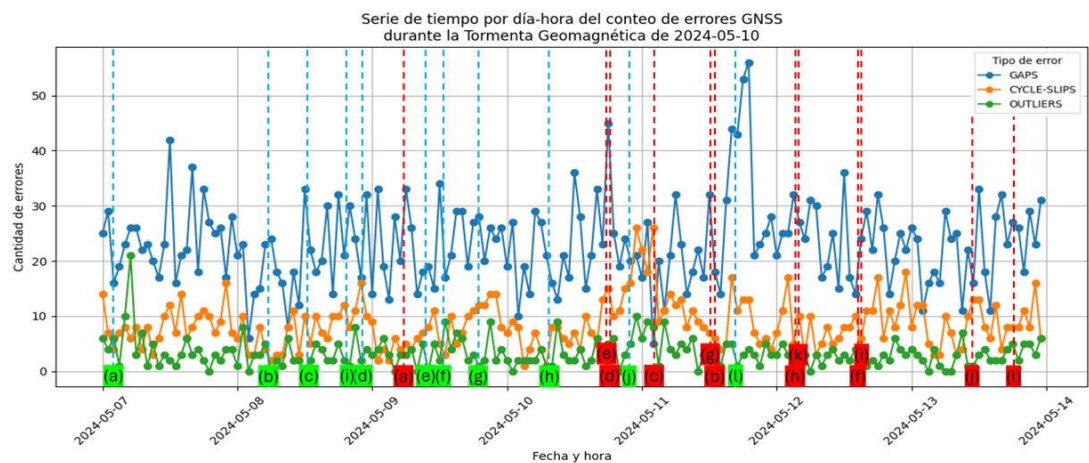


Figura 4.23: Las marcas de letras en verde corresponde al momento de emisión de la tabla anterior, las marcas de las mismas letras en rojo corresponden a la llegada a la Tierra de dichas masas. Aquí vemos que justo en los dos impactos importantes del día 10 y 11 hubo picos importantes de GAPS y algo menores de CYCLE-SLIPS.

4.4. Estudio de Caso: La Tormenta Geomagnética del 10 al 13 de mayo de 2024

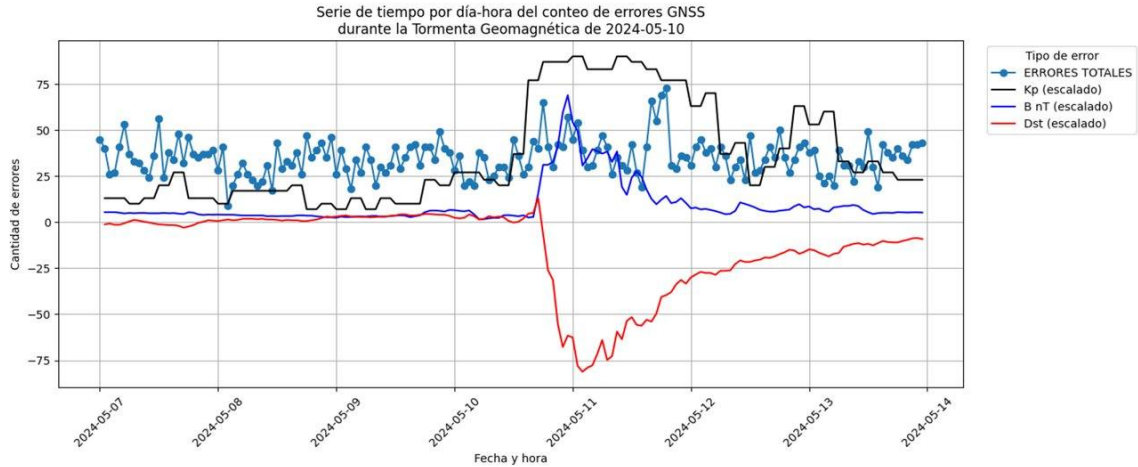


Figura 4.24: Comparación de los errores GNSS totales de la misma línea de tiempo con la variación del campo magnético B, y los índices Kp y Dst. Datos solares: OMNIWeb Plus Interface. contact: Dr. Natalia Papitashvili, Code 672, Greenbelt, MD 20771.

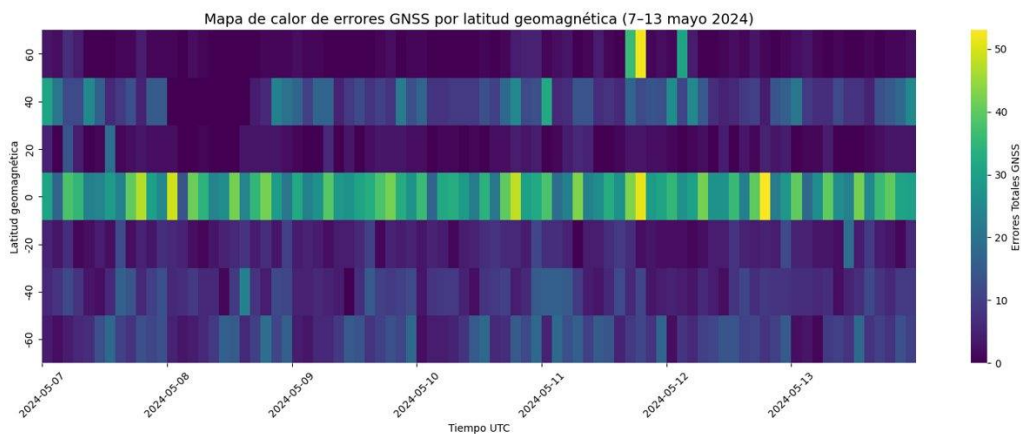


Figura 4.25: Mapa de calor de la suma total de errores durante 7 días relativos a la tormenta. Cada fila corresponde a una latitud. Se puede observar la contribución más importante en PTEX y en APMA.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se analizaron los errores registrados en los datos del Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS), asociados a la actividad solar, estación del año, hora local y la posición geográfica de las estaciones receptoras. Encontramos que discriminar los errores por tipo, nos permitió identificar las distintas fuentes o fenómenos asociados, lo que resultó en una descripción más precisa. Entre los resultados se destaca lo siguiente:

1. Se evidenció que los errores GNSS tienden a incrementarse con la actividad solar, principalmente asociada al ciclo solar, y en menor medida debido a variaciones diarias identificadas mediante el índice Kp. Este efecto es más notable en los errores tipo *cycle-slips*, que muestran una sensibilidad marcada frente a dichas condiciones.
2. Se identificó un patrón consistente de *cycle-slips* vespertinos entre las 18 y 22 horas locales, presente en la mayoría de estaciones y épocas del año. Este comportamiento constituye un elemento relevante para la caracterización de la ionósfera, posiblemente asociado con procesos de recombinación y la interacción del plasma con el campo magnético terrestre.
3. Se evidenció una direccionalidad en la distribución de los *cycle-slips*, con mínimos en el eje Este-Oeste en más del 90 % de los casos y máximos en el eje Norte-Sur, lo que sugiere una dependencia geométrica en la ocurrencia de estos errores.
4. Los mapas de la elevación contra el azimut de los errores para cada estación, *GAP* y

CYCLE-SLIP, mostraron, en algunos casos, zonas o regiones con errores persistentes a través del tiempo.

5. La comparación entre cobertura satelital y errores mostró discrepancias en ciertos casos, con lecturas en regiones sin tránsito de señales, lo que apunta a factores adicionales en la generación de *cycle-slips*.
6. El estudio de la tormenta geomagnética de mayo de 2024 indicó que los *GAPS* presentan mayor sensibilidad a perturbaciones espaciales intensas, con una respuesta modulada por la latitud de las estaciones. Este aspecto abre la necesidad de estudios más detallados en escenarios de actividad solar elevada.

Estos hallazgos aportan elementos novedosos para la comprensión de los errores en observaciones GNSS y señalan limitaciones metodológicas que deberán considerarse en investigaciones futuras. En conjunto, el trabajo establece un marco sólido para avanzar en la caracterización de errores y su impacto en aplicaciones de astrofísica planetaria y tecnologías afines.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten consolidar una caracterización más precisa de los errores en observaciones GNSS, aportando evidencia de patrones temporales, espaciales y de respuesta a condiciones geomagnéticas. Aunque persisten limitaciones metodológicas que deberán atenderse en estudios posteriores, el presente trabajo establece un punto de partida interesante para investigaciones futuras o seguimiento de las actuales orientadas a comprender la interacción entre la ionósfera y los sistemas de posicionamiento.

5.1. Trabajo futuro

- Estudiar el comportamiento de estos errores con un número más significativo de estaciones en latitudes y longitudes más diversificado para caracterizar adecuadamente este pico de errores *CYCLE-SLIPS* vespertino.
- Los mapas de la elevación contra el azimut de los errores para cada estación, *GAP* y *CYCLE-SLIP*, mostraron, en algunos casos, zonas o regiones con errores persistentes

a través del tiempo. Sería bueno investigar más a fondo este fenómeno contrastando las mismas fechas en estaciones vecinas que ayuden a corroborar la naturaleza de estas zonas.

- Corroborar el resultado del análisis de la tormenta geomagnética de mayo de 2024 con otras tormentas solares que confirmen en diferentes casos de manera independiente el aumento de errores tipo *gap* en los momentos de impacto de la misma en la Tierra.
- Extender el análisis para un mayor número de frecuencias, es decir, usar el resto de las constelaciones, tales como *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), *Big Dipper* (BeiDou) o GALILEO, con la finalidad de entender la respuesta de los errores con respecto a la frecuencia de la señal.
- Estudiar qué influencia tiene la ionósfera en la aparición de errores. En este punto, nos interesa saber cómo se ve afectada la estimación del TEC, comparando diferentes escenarios: (1) Usando datos crudos de los archivos RINEX, (2) limitando la lectura, omitiendo los errores GNSS de los archivos y (3) hacer la estimación del TEC después de aplicar algoritmos de mitigación y/o corrección de los errores detectados.
- Desarrollar modelos que permitan mitigar o corregir los errores de manera correcta, evitando la eliminación de información que podría ser clave para algunas investigaciones.
- Realizar un estudio extensivo de todas las estaciones GNSS de México y establecer el estado del arte actual de todo el sistema con la finalidad de conocer con lo que se cuenta para las investigaciones sobre la ionósfera de tal modo de proponer mejoras y nuevas locaciones para fortalecer nuestra red geodésica.
- Con lo aprendido en este rubro, acerca de los datos RINEX se puede vislumbrar el desarrollo de aplicaciones para móviles con la capacidad de tener datos en tiempo real del estado de la ionósfera y muy posiblemente con la capacidad de hacer que los móviles funcionen como subestaciones GNSS que complementen los datos de las estaciones permanentes.

- Repetir el análisis con archivos RINEX de mayor resolución (cadencias al menos de 1 segundo) para establecer mejores criterios para caracterizar los *CYCLE-SLIPS*, *GAPS* y *OUTLIERS*.

Apéndice A

Constelaciones del Sistemas GNSS

El sistema de posicionamiento global comenzó en Estados Unidos de América con el desarrollo del sistema *NAVigation Satellite Timing And Ranging* (NAVSTAR), que posteriormente se conocería como GPS. Aunque inicialmente fue concebido para fines militares, su uso se extendió rápidamente a aplicaciones comerciales y civiles, convirtiéndose en una tecnología ampliamente utilizada en todo el mundo (Spilker Jr *et al.*, 1996).

El impacto del (GPS) en las actividades humanas fue tan profundo que definió un nuevo estándar en la tecnología moderna. Esta innovación no solo revolucionó la navegación y la geolocalización, sino que también inspiró a otras naciones a desarrollar sistemas similares, utilizando técnicas comparables.

En respuesta al éxito del GPS, Rusia desarrolló su propio sistema de navegación por satélite, conocido como GLONASS. Este proyecto comenzó en la era soviética, en 1976, y ha evolucionado significativamente desde entonces.

China, por su parte, lanzó el sistema BeiDou, que comenzó en 1994 y ha crecido hasta convertirse en una constelación global, proporcionando servicios no solo en Asia, sino en todo el mundo.

Europa, consciente de la dependencia de sistemas extranjeros, desarrolló el Sistema Galileo, un esfuerzo que comenzó en 2003 con el objetivo de proporcionar un servicio global independiente y civil.

India también se unió a la competencia con el *Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS), también conocido como *Navigation Indian Constellation* (NavIC), que fue diseñado para cubrir principalmente la región del subcontinente indio.

Japón, por su parte, desarrolló el *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS), un sistema regional que complementa al GPS, mejorando su precisión en el territorio japonés (Misra, 2006; Montenbruck *et al.*, 2002; Spilker Jr *et al.*, 1996).

Cada país o región responsable de cada constelación de satélites de posicionamiento ha tenido evoluciones y planes diferentes y se ha desarrollado de acuerdo a estrategias que dependen del equipo técnico e intereses de la propia región. Podríamos resumir lo anterior en la tabla siguiente:

Constelación	País/Región	Operadora	Año inicio	Inflexión
GPS	Estados Unidos	<i>U.S.Space-Force</i>	1978	Global: 1993
GLONASS	Rusia	ROSCOSMOS	1982	Global: 1995
BeiDou (BDS)	China	CNSA	2000	Global: 2020
Galileo	Unión Europea	ESA EUSPA	2005	Opera: 2016
NavIC (IRNSS)	India (y región)	ISRO	2013	Opera: 2018
QZSS	Japón (y región)	JAXA - QSS Inc.	2010	Opera: 2018

Cuadro A.1: Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).

Nota. Las siglas: Administración Espacial Nacional de China (CNSA), GLONASS, Agencia Espacial Federal de Rusia (ROSCOSMOS), BeiDou, Agencia Espacial Europea (ESA), *European Union for the Space Programme Agency* (EUSPA), NavIC, IRNSS, *Indian Space Research Organisation* (ISRO), *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), QZSS se encuentran definidos en la sección de Acrónimos.

Estado actual de las Constelaciones GNSS

En el momento del desarrollo de este trabajo y su conclusión nos permitimos informar el estado actual de cada constelación como una referencia al avance que han tenido desde su creación. Así que el estatus de cada grupo de satélites es el siguiente:

De todos los sistemas GNSS actualmente operativos, esta investigación se apoyará exclusivamente en datos procedentes del sistema GPS. Las características de los demás

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos	24	Distribuidos en 3 planos orbitales
Satélites en prueba de vuelo	2	Satélites GLONASS-K2 en órbita en fase de validación
Satélites en reserva en tierra	4	Preparados para lanzamiento
Satélites en mantenimiento	0	No reportados actualmente
Satélites de repuesto en órbita	0	No disponibles actualmente

Cuadro A.2: Estado de la constelación *GLONASS* (julio 2025)

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos (BDS-3)	44	Órbitas MEO, GEO e IGSO, cobertura global
Satélites en actualización o pruebas	No especificado	Modernización en curso
Próximos lanzamientos	3	Satélites de prueba para nueva generación (2027)

Cuadro A.3: Estado de la constelación *BeiDou* (julio 2025)

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos	32	Constelación nominal completa
Satélites en pruebas o puesta en servicio	2–4	Nuevos satélites en fase de validación
Satélites planificados	6	Lanzamientos previstos 2025–2026

Cuadro A.4: Estado de la constelación *Galileo* (julio 2025)

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos	7	Cobertura regional sobre India
Satélites de nueva generación	1–2	NVS-01 lanzado, modernización en curso
Próximos lanzamientos	5	Para ampliar y reemplazar constelación actual

Cuadro A.5: Estado de la constelación *IRNSS/NavIC* (julio 2025)

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos	4	Cobertura regional Asia-Pacífico
Satélites en pruebas/desarrollo	3	QZS-5, 6 y 7 en fase de pruebas
Constelación prevista	7	Servicio completo a partir de 2025

Cuadro A.6: Estado de la constelación *QZSS* (julio 2025)

sistemas (GLONASS, Galileo, BeiDou, etc.) no serán necesarias para los objetivos planteados en este estudio. Por lo tanto, a partir de este punto, los términos GPS y GNSS se utilizan de manera indistinta, refiriéndose específicamente al sistema GPS.

Clasificación	Cantidad	Detalles relevantes
Satélites operativos	32	Cobertura global completa
Satélites en reserva o pruebas	7	En órbita, listos para activar
Satélites en mantenimiento	Variable	Temporalmente fuera de servicio por pruebas
Satélites retirados	39	En órbitas de disposición
Satélites disponibles para lanzamiento	2	Block <i>III</i> , listos para lanzamiento

Cuadro A.7: Estado de la constelación GPS (julio 2025)

Sistema	Operativos	En Reserva	Próximos lanzamientos	Cobertura
GPS	32	7	2	Global
BeiDou	44	No especificado	3	Global
Galileo	32	2–4	6	Global
IRNSS/NavIC	7	1–2	5	Regional (India)
QZSS	4	3	3	Regional (Asia)

Cuadro A.8: Resumen comparativo de las constelaciones GNSS (julio 2025)

Es necesario mencionar que los sistemas de satélites, a los que llamamos Constelaciones, no son la única parte del sistema. Se puede dividir este conjunto de piezas en tres segmentos, el primero es el **segmento espacial** que consiste en el conjunto de vehículos espaciales que orbitan la Tierra. Hay otro segmento que es el llamado **segmento de control** que consiste principalmente en cierta cantidad de bases en tierra que tienen como misión enviar comandos a los satélites para asegurar su buen funcionamiento, con ello se asegura que sus órbitas se mantengan estables, sus relojes sincronizados y sus sistemas funcionando debidamente. Su funcionamiento no puede ser eficiente sin el apoyo de una red muy grande de receptores GNSS distribuidos mundialmente que registran meticulosamente las señales de los satélites de todas las constelaciones. Estos receptores son sustentados por muchas organizaciones, instituciones, universidades, y grupos que guardan y distribuyen esta información, en su mayoría para uso científico, astronómico y geodésico, para una referencia sobre estas entidades, consultar Bosy (2014). Estos receptores establecidos en estaciones fijas denominadas **estaciones GPS** o en general **estaciones GNSS** retroalimentan al segmento de control y con ello dan apoyo para el mejor funcionamiento de todo el sistema (Galera Monico, 2008; IGS, 2024).

El tercer segmento es el de los **usuarios** que comprende en general todos aquellos que usan el servicio de posicionamiento, ya sean personas o dispositivos. En este segmento

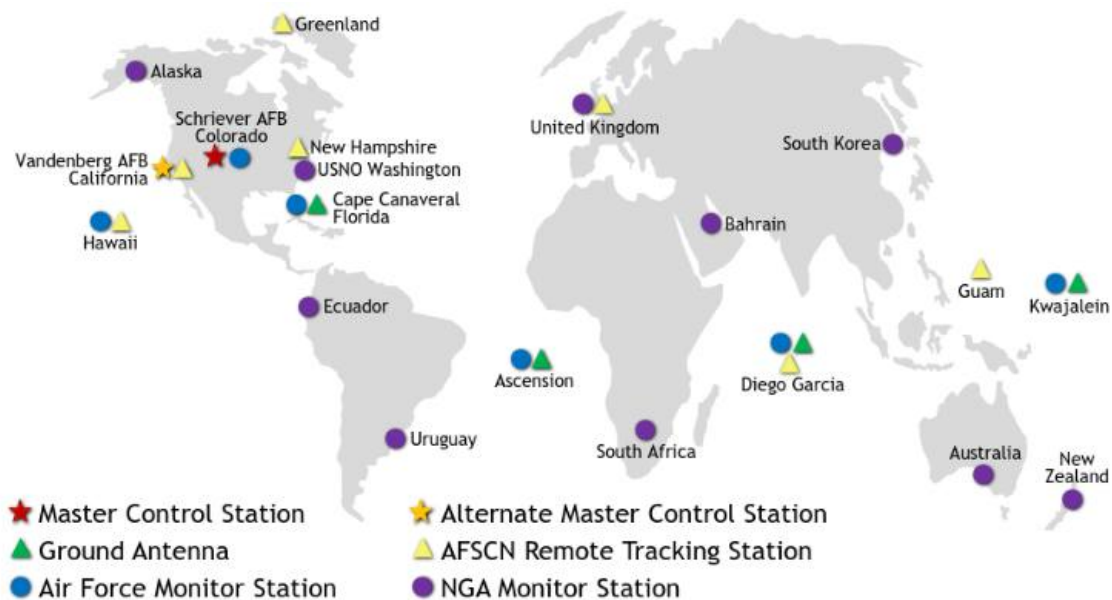


Figura A.1: Segmento de control GPS
 Hegarty *et al.* (2017); GPS.GOV (2024)

se habla también de receptores capaces de obtener e interpretar datos del sistema GPS, ya sean de aplicación civil o militar (da Silva Picanço, 2019). Entre los usos generales está principalmente el del posicionamiento. Sin embargo, además se deben mencionar instituciones como las universidades o instituciones de investigación que soportan las estaciones GNSS (incluido GPS) con la finalidad de llevar un registro del comportamiento de las transmisiones de todos los satélites del sistema GNSS en muchos puntos del planeta, permitiendo tener una base de datos que proporciona una visión detallada del estado de todo el sistema GNSS que, por un lado, proporciona un apoyo al segmento de control (Hegarty *et al.*, 2017), pero también ayuda a monitorizar el TEC ionosférico y con ello la actividad solar, esto es un apoyo invaluable hacia la investigación científica.

Apéndice B

Proceso de Foto Ionización

El flujo de radiación X y UVE varía dependiendo diferentes factores, tales como la hora del día, las estaciones del año, la actividad solar, etc., por lo que la tasa de ionización cambia. En la medida que la radiación ionizante penetra en las regiones más densas de la atmósfera, la producción de pares ion-electrón aumenta hasta alcanzar un nivel máximo, llamado pico de ionización. En la Figura B.1 se bosqueja esta idea, mostrando como la radiación ionizante disminuye gradualmente conforme la densidad de la atmósfera neutra aumenta, por lo que en la intersección de esas dos curvas se encontrará la máxima tasa de ionización. Por debajo de este nivel, la producción de electrones tiende a disminuir, porque aunque aumenta la densidad de los constituyentes neutros, la mayor parte de la radiación de alta frecuencia ya ha sido absorbida y la tasa de pérdida electrónica predomina sobre la tasa de producción (da Silva Picanço, 2019).

Elemento	Energía mínima (eV)
Monóxido de Nitrógeno (NO)	9.26
Ozono (O_3)	12.7
Hidrógeno (H)	13.6
Oxígeno (O)	13.6
Dióxido de Carbono (CO_2)	13.8
Nitrógeno (N)	14.5
Argón (Ar)	15.8
Neón (Ne)	21.6
Helio (He)	24.6

Cuadro B.1: Energía mínima de ionización de gases de la atmósfera (Lide, 2004).

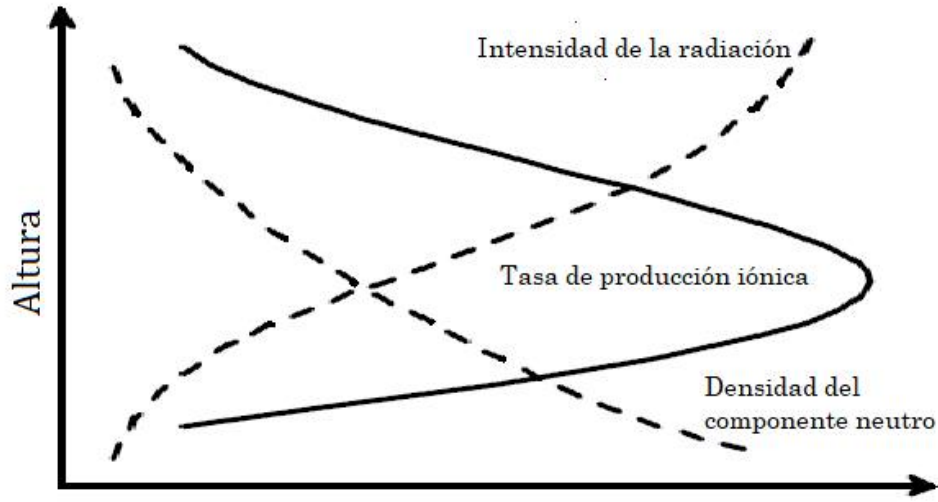


Figura B.1: Perfil vertical de la tasa de producción de iones en la ionósfera, tomando en cuenta la altura, la intensidad de la radiación solar y densidad de los componentes neutros de la atmósfera. Imagen adaptada de Treumann y Baumjohann (1997)

La energía de ionización está dada por la ecuación de Planck-Einstein:

$$E = hf = hc/\lambda \quad (\text{B.1})$$

donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck, f es la frecuencia del fotón, c la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda del fotón. Tomando como referencia los valores de la energía mínima de ionización dados en la tabla (B.1) el oxígeno, que se ioniza con fotones de 13.6 eV o más, se infiere que la banda del espectro electromagnético capaz de ionizar los gases de la atmósfera deben ser de $\lambda < 280nm$, lo cual equivale a la radiación UVE, los rayos X y los rayos gamma.

Haciendo el cálculo más preciso, dado que la unidad de energía $1eV = 1.602 \times 10^{-19}J$, tenemos que la energía de un fotón de 13.6 eV equivale a su valor multiplicado por $1eV$ que da igual a $2.17872 \times 10^{-18}J$ de lo cual tomando la ecuación (B.1) y despejando la λ tenemos que

$$\lambda = hc/E = \frac{(6.626 \times 10^{-34}Js) \cdot (3 \times 10^8m/s)}{2.17872 \times 10^{-18}J} = 9.11 \times 10^{-8}m = 91.1nm$$

esta longitud de onda pertenece a la banda del ultravioleta extremo (UVE).

Durante el día, cuando la radiación llega directamente sobre las capas superiores de la atmósfera, este proceso llega a máximos que aumentan la cantidad de electrones libres en la ionósfera. Las capas se modifican para dar cabida a la producción de iones. Durante la noche, cuando la fuente de ionización disminuye, comienza a predominar el proceso de recombinación. Esto revierte el proceso de ionización. La tasa de recombinación en la ionósfera se refiere al proceso inverso a la ionización, en el cual los electrones libres se recombinan con iones positivos, reduciendo la densidad de electrones (Kelley, 2009).

Debido a que ambos procesos nunca son nulos en la ionósfera, la suma entre ambos oscila entre valores máximos y mínimos que tienen que ver con las condiciones cambiantes de la ionósfera. La tasa de recombinación idealmente está dada por:

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e^2 \quad (\text{B.2})$$

donde N_e es la densidad de electrones, q es la tasa de producción de electrones debido a la foto-ionización, α es el coeficiente de recombinación, el término αN_e^2 representa la tasa de recombinación, que es proporcional al cuadrado de la densidad de electrones. El término de recombinación αN_e^2 tiene en cuenta que la probabilidad de recombinación aumenta con la densidad de electrones. Dependiendo de la altitud y de la especie ionizada, los valores de α varían.

Si se considera invariante en el tiempo la densidad de electrones,

$$\frac{dN_e}{dt} = 0$$

se tiene una relación que ilustra el estado de equilibrio entre la foto-ionización y la recombinación. Despejando la densidad de electrones se tiene:

$$N_e = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \quad (\text{B.3})$$

Esto muestra cómo la densidad de electrones en equilibrio depende tanto de la tasa de ionización q como de la tasa de recombinación α . Este equilibrio cambia dependiendo de las condiciones diurnas o nocturnas y los cambios en la actividad solar, como se mencionó antes (Kelley, 2009; Rishbeth y Garriott, 1969). Continuar con la siguiente sección (2.2).

Apéndice C

Estructura de la Ionósfera

El término *ionósfera* fue utilizado por primera vez por Sir Robert Watson-Watt en una carta al secretario de la Junta Británica de Investigación de Radio en 1926. Esta expresión se generalizó entre los años 1932 y 1934, cuando Watson-Watt, Appleton, Ratcliff y otros científicos la comenzaron a utilizar en artículos y libros. Antes de que este término ganara aceptación mundial, se le denominaba capa Kennelly-Heaviside, también se le llamaba capa conductora superior o atmósfera superior ionizada (Hunsucker y Hunsucker, 1991; Scott y Wild, 2025).

Desde ese momento, el interés por esta capa atmosférica creció exponencialmente, y con ello, las investigaciones sobre sus interesantes propiedades. Debido a su posición en la parte superior de la atmósfera, la *ionósfera* está expuesta a radiación proveniente del espacio exterior del rango de los rayos UVE, X y Gamma. En particular, los rayos UVE y X son responsables del proceso de foto-ionización que da origen a esta región (Kelley, 2009).

En la actualidad se sabe que la ionósfera es una capa de la atmósfera terrestre ubicada aproximadamente entre los 60 hasta más allá de los 1000 kilómetros de altura. Se caracteriza por una alta concentración de iones y electrones libres, con energías en el rango de 1 a 10 eV o más en casos excepcionales, lo que la confirma como un plasma (Kelley, 2009; Duhau y Azpiazu, 1981). Esta capa no es exclusiva de la Tierra; muchos cuerpos del sistema solar, e incluso más allá, poseen envolturas de gas parcialmente ionizado, originadas

ya sea por la radiación de su estrella (como el Sol) o por procesos de sublimación, como ocurre con los cometas (Stubbe y Hagfors, 1997).

La estructura, composición y dinámica de la ionósfera están influenciadas principalmente por la radiación solar ionizante, especialmente en el lado diurno de la Tierra. Se estima que esta radiación es responsable más del 90 % de su ionización bajo condiciones de actividad solar moderada o baja. Otras fuentes de radiación no solares tienen una contribución menor, aunque su relevancia puede aumentar en circunstancias específicas. Estas fuentes incluyen:

- **Rayos cósmicos galácticos:** Aportan aproximadamente entre un 1 y 2 % de la ionización total en la atmósfera superior.
- **Radiación de partículas energéticas solares:** Durante eventos solares intensos, esta radiación puede aumentar considerablemente, llegando a ser comparable o incluso superior a la radiación UV en las regiones polares.
- **Precipitación de partículas atrapadas en la magnetosfera:** Es significativa en las regiones circumpolares (boreales o australes), aunque su impacto es generalmente menor en comparación con la radiación solar global (Schunk y Nagy, 2009).

En resumen, considerando las variaciones en la posición relativa entre el Sol y la Tierra, las fuentes de ionización en la atmósfera entre el Sol y otras fuentes queda reducida a una proporción aproximada de 93 % a 7 %, ver figura C.1.

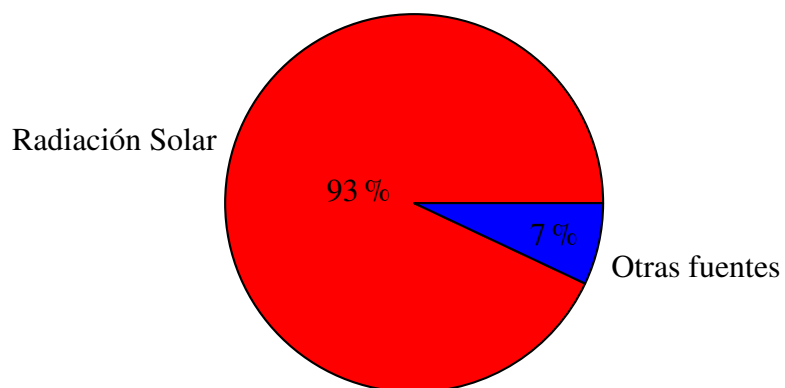


Figura C.1: Ionización debida a la radiación solar vs. otras fuentes (Hargreaves, 1992).

De acuerdo a los datos anteriores, se puede asumir con seguridad que la causa de las variaciones estudiadas en este estudio son debidas mayormente a los cambios en la actividad solar y a los desplazamientos relativos entre el Sol y la Tierra, por lo que se desprecian los efectos de otros factores distintos al Sol. Estas causas moldean una estructura de divisiones débiles y cambiantes, pero con características suficientes que permiten su análisis y comprensión. Cada una de las capas de la ionósfera se pueden describir como sigue:

■ Capa D

- Comienza aproximadamente entre los 60 y 90 km de altura.
- Es la más baja y menos ionizada de las capas, su ionización está conectada con eventos realmente energéticos, la radiación del ultravioleta extremo que alcanza a penetrar hasta esta capa aumenta la densidad de electrones, esto sucede durante el día, en la noche disminuye gracias a la disminución de la radiación directa del Sol y el proceso de recombinación iónica que reduce drásticamente los electrones libres.
- En esta capa predominan los iones de NO^+ y O_2^+ .
- Esta capa absorbe fuertemente las ondas de radio *Medium Frequency* (MF) y *Low Frequency* (LF) de media y baja frecuencia.

■ Capa E

- Se encuentra a una altura entre 90 y 150 km.
- Está presente durante el día, pero puede persistir débilmente por la noche.
- Puede mostrar irregularidades conocidas como “capas E esporádicas”.
- Sus iones dominantes son O_2^+ y NO^+ .
- Influencia en ondas de radio: Refleja ondas de radio de frecuencia media y alta (MF y *High Frequency* (HF)).

■ Capa F1

- Se halla entre los 150 y 200 km.

-
- Solo está presente durante el día y en latitudes medias y se fusiona con la capa $F2$ durante la noche. Sus iones dominantes: O^+ y NO^+ .
 - Transición de química molecular a atómica.
 - Tiene influencia en ondas de radio contribuyendo a la refracción de ondas de radio HF.

■ Capa F2

- Altura: 200-500 km (pico típicamente alrededor de 300-400 km).
- Presenta características interesantes en cuanto a ser la capa más densa y persistente de la ionósfera.
- Presente día y noche, aunque con grandes variaciones conectadas con la actividad solar, estación del año y ubicación geográfica.
- Sus características químicas denotan que su ion dominante es O^+ .
- Influencia en ondas de radio: Es la principal capa para la reflexión de ondas de radio, sobre todo del tipo HF, que es muy importante para comunicaciones de larga distancia.

■ Región superior

- A veces considerada parte de la capa F ($F3$), la tenemos por encima de los 500 km.
- La densidad del plasma decrece gradualmente con la altura.
- Sus iones dominantes: O^+ , H^+ , He^+ (la proporción cambia con la altura).
- Afecta a las señales de satélite y contribuye al retardo ionosférico total (Bychkov *et al.*, 2014).

Continuar al contenido principal, sección (2.3).

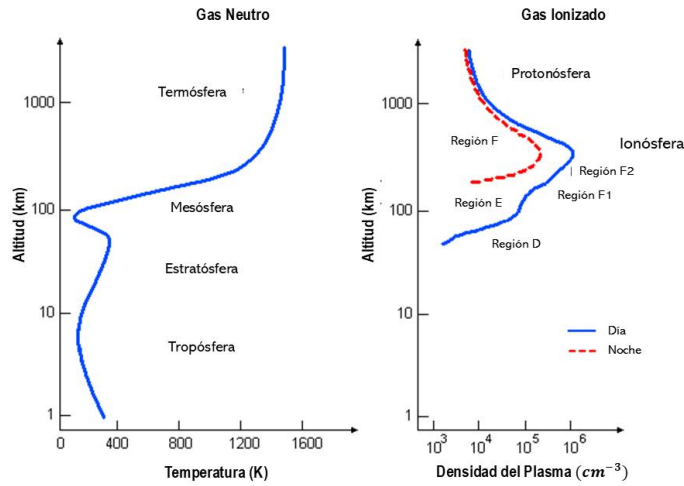


Figura C.2: Perfiles típicos de la temperatura de la atmósfera neutra y la densidad del plasma con varias capas señaladas. Caso día y caso noche. Adaptado de (Kelley, 2009)

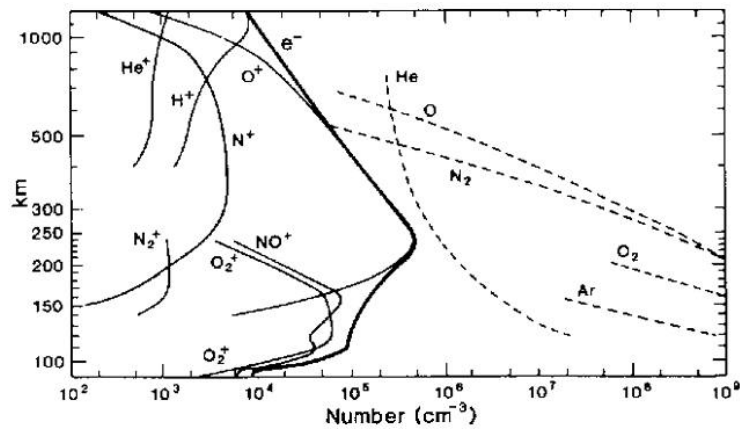


Figura C.3: Composición ionosférica basada en mediciones de un espectrómetro de masas durante el día por un año en período de mínimo solar. Tomado de Johnson (1979); Luhmann (1995)

Apéndice D

Ionósfera como Plasma

Debido a su naturaleza de plasma, la ionósfera es un gas con una abundante cantidad de cargas libres que alteran significativamente sus propiedades macroscópicas. Estas partículas cargadas forman regiones conocidas como esferas o escudos de Debye, cuya extensión es considerable en comparación con la separación entre partículas. En este tipo de regiones, la densidad de cargas libres es suficiente para influir en el comportamiento general del plasma. El tamaño de cada esfera de Debye depende de las condiciones específicas del plasma (Stubbe y Hagfors, 1997).

La longitud de Debye es una medida de la distancia a la que los efectos electrostáticos en un plasma son significativamente *apantallados* o cubiertos por un escudo característico. En otras palabras, representa la escala a la cual una perturbación en la densidad de carga es neutralizada por el movimiento de las partículas cargadas. Se define como:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{N_e e^2}} \quad (\text{D.1})$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, k_B es la constante de Boltzmann, T_e la temperatura de los electrones, N_e es la densidad numérica de los electrones y e es la carga del electrón, se observa cómo esta distancia aumenta con la temperatura de los electrones libres y disminuye con la densidad electrónica (Fitzpatrick, 2022).

En un plasma, los electrones libres exhiben un comportamiento característico que los

obliga a oscilar naturalmente en respuesta a perturbaciones en la distribución de cargas eléctricas. Esta oscilación colectiva se conoce como la frecuencia de plasma, y su valor es crítico para determinar cómo el plasma interactúa con las señales electromagnéticas que atraviesan la ionósfera (Fitzpatrick, 2022).

La expresión se define con la siguiente expresión:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (\text{D.2})$$

donde f_p es la frecuencia del plasma, m_e es la masa del electrón. Se ve que la frecuencia disminuye con el aumento de la masa de la partícula involucrada, en este caso tratamos el electrón, pero esta expresión es válida con iones más pesados. También vemos que aumenta con la densidad de los electrones. Ambas expresiones, la longitud de Debye y la frecuencia del plasma están estrechamente relacionadas (Fitzpatrick, 2022).

Dadas las ecuaciones (D.1) y (2.2) se observa que tienen un término en común. Y dado que $\omega_p = 2\pi f_p$ podemos deducir fácilmente que:

$$\omega_p \lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}} \quad (\text{D.3})$$

Si los electrones libres en el plasma responden a un campo eléctrico oscilante con frecuencia angular ω , el campo eléctrico $\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$ induce una oscilación periódica que a su vez induce una aceleración que se obedece a la 2a ley de Newton. Esto se puede describir con:

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = -e \vec{E}(t) \quad (\text{D.4})$$

La respuesta de los electrones al campo eléctrico genera una corriente en el plasma, conocida como densidad de corriente $\vec{J}$, que está relacionada con la polarización del plasma e induce una corriente, cuya densidad es:

$$\vec{J} = -N_e e \vec{v} \quad (\text{D.5})$$

donde N_e es la densidad de los electrones y $\vec{v}$ su velocidad.

Este campo eléctrico en el plasma, bajo un campo magnético, se puede describir con

la ley de Ampère-Maxwell:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{D.6})$$

donde si se combina con el movimiento oscilatorio de los electrones, asumiendo una solución armónica del tipo: $e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$ se obtiene una relación entre el campo eléctrico, la densidad de los electrones y la frecuencia.

De aquí se obtiene la ecuación de dispersión que describe cómo las ondas electromagnéticas se propagan en un plasma. En un plasma sin colisiones, esta ecuación de dispersión se obtiene combinando las ecuaciones de Maxwell con la respuesta de los electrones al campo:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (\text{D.7})$$

donde ω es la frecuencia angular de la señal electromagnética atravesando el medio, ω_p es la frecuencia del plasma descrito en (2.2) que depende de la densidad de los electrones, k es el número de onda, parámetro relacionado con la longitud de onda de la señal y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Esta expresión (2.3) se puede interpretar según los siguientes casos: (1) La ecuación de dispersión muestra que la frecuencia de la onda ω es una combinación de la frecuencia del plasma ω_p y la componente de propagación de la onda $c^2 k^2$. (2) Si la frecuencia de la onda electromagnética ω es mucho mayor que la frecuencia del plasma ω_p , el término de propagación $c^2 k^2$ domina, y la onda se propaga casi como en el vacío. Si ω es comparable o menor que ω_p , el término de frecuencia de plasma se vuelve significativo, afectando la propagación de la onda (Chen *et al.*, 1984).

Regresar a la secuencia principal en la sección 2.4.

Apéndice E

Contenido Total de Electrones (TEC)

El Contenido Total de Electrones (TEC) es un parámetro clave en el estudio de la ionósfera y su impacto en las señales de radio. Se define como el número total de electrones libres presentes en una columna de un metro cuadrado a lo largo de la trayectoria entre el transmisor y el receptor (Mannucci *et al.*, 1998). El TEC se expresa como la integral de la densidad de electrones a lo largo de dicha trayectoria:

$$TEC = \int_{sat-rec} N_e ds \quad (E.1)$$

donde N_e es la densidad de electrones y la integral se calcula a lo largo de la trayectoria de la señal. La unidad estándar de TEC es el TECU (Unidad de TEC), donde 1 TECU equivale a $10^{16} \text{ electrones}/m^2$ (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

El TEC, como ya se ha mencionado antes, es fundamental para caracterizar la ionósfera y su variabilidad temporal y espacial, fluctuando con el ciclo solar, la hora del día, la estación y la ubicación geográfica. Además, el retardo que experimentan las señales de radio al atravesar la ionósfera es directamente proporcional al TEC, lo que lo convierte en un parámetro crítico para los sistemas de navegación por satélite (Komjathy, 2023).

Según las ecuaciones deducidas en la sección relativa al retardo ionosférico, éste es consecuencia de la dispersión de las ondas electromagnéticas al interactuar con el plasma ionosférico. Se define como la diferencia entre el tiempo de viaje de una señal a través de la ionósfera y el tiempo que tomaría en el vacío. Este retardo, proporcional al TEC e

inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, se expresa como:

$$\Delta t = \frac{40.32}{cf^2} TEC \quad (E.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y f es la frecuencia de la señal (Klobuchar, 1996; Davies, 1990).

El retardo ionosférico está directamente relacionado con la línea de visión entre el satélite y el receptor, por lo que debe manejarse adecuadamente para obtener resultados generalizables. Los valores obtenidos deben corregirse para eliminar las contribuciones de la localización, desfases de relojes y condiciones meteorológicas locales (Klobuchar, 1996; Galdyn *et al.*, 2023; da Silva Picanço, 2019).

El TEC representa la cantidad de electrones libres por metro cuadrado a lo largo de la línea de visión satélite-receptor. Dado que el ángulo cenital de los satélites cambia constantemente debido a su movimiento orbital, para generar mapas bidimensionales de la ionósfera, el TEC debe ser convertido a *Vertical TEC* (VTEC) (TEC Vertical). El *Slant TEC* (STEC) (del inglés: TEC Inclinado) es la componente oblicua del TEC que describe la variación de electrones libres a lo largo de la trayectoria satélite-receptor.

Regresar a la secuencia principal en la sección 2.5.

Apéndice F

Propagación de Ondas en el Plasma Ionosférico

Para entender el retraso ionosférico, primero es necesario abordar el fenómeno de la refracción en un medio dispersivo. Esto implica, considerar el concepto de velocidad de fase de una onda. En términos de mecánica ondulatoria, la velocidad de fase se define como el producto de la longitud de onda (λ) y la frecuencia de la onda (f). Dado que el período de la onda (P) es el inverso de su frecuencia en Hertz, la velocidad de fase también puede expresarse como la longitud de onda dividida por el período (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007; Galera Monico, 2008),

$$v_f = \lambda/P = f\lambda \quad (\text{F.1})$$

En el caso de las señales GNSS, la transmisión consiste en una señal modulada que transporta información desde los satélites hasta los receptores en la Tierra, atravesando la atmósfera a través de una onda portadora. La propagación de esta señal a través de la ionósfera depende de la naturaleza dispersiva del medio, lo que afecta tanto la velocidad de fase como la velocidad de grupo (Misra, 2006). En este contexto, la velocidad de grupo v_g , que describe cómo se propaga la información en la señal modulada, puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$v_g = -\frac{df}{d\lambda}\lambda^2 \quad (\text{F.2})$$

Es posible obtener una relación entre v_g y v_f si se obtiene la derivada de la expresión F.1,

$$dv_f = f d\lambda + \lambda df \quad (\text{F.3})$$

se divide entre $\lambda \cdot d\lambda$ y se obtiene:

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dv_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \quad (\text{F.4})$$

sustituyendo este resultado en la ecuación F.2:

$$v_g = - \left(\frac{1}{\lambda} \frac{dv_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \right) \lambda^2 \quad (\text{F.5})$$

$$v_g = -\lambda \frac{dv_f}{d\lambda} + f\lambda \quad (\text{F.6})$$

si además, se sustituye, v_f de F.1 se obtiene:

$$v_g = v_f - \lambda \frac{v_f}{d\lambda} \quad (\text{F.7})$$

Cuando la señal modulada se propaga en el vacío, las ecuaciones previamente presentadas son adecuadas. No obstante, en el caso de señales que atraviesan la ionósfera y otras capas de la atmósfera, es necesario considerar la refracción, la cual afecta la velocidad de la señal electromagnética (da Silva Picanço, 2019). Esta velocidad está dada por la expresión:

$$v = \frac{c}{n} \quad (\text{F.8})$$

donde v representa la velocidad de la señal (ya sea de fase o de grupo), c la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción.

Tanto la velocidad de grupo como la velocidad de fase son afectadas de manera distinta por la refracción ionosférica. Cada una se expresa de diferente forma:

$$n_f = \frac{c}{v_f} \quad (\text{F.9})$$

donde n_f es el índice de refracción de fase y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para encontrar el índice de refracción de la velocidad de grupo se puede partir de la misma ecuación (F.9) antes descrita y se deriva con respecto a λ .

$$\frac{dv_f}{d\lambda} = -\frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (\text{F.10})$$

Partiendo de la ecuación (F.7) se sustituyen en ella las expresiones (F.2), (F.1) y (F.10),

$$\frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_f} - \lambda \left(-\frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda} \right) \quad (\text{F.11})$$

de ahí se obtiene:

$$\frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_f} \left(1 + \frac{\lambda}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right) \quad (\text{F.12})$$

de donde se divide entre c y se redistribuyen los términos,

$$n_g = n_f \left(1 + \frac{\lambda}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right)^{-1} \quad (\text{F.13})$$

debido a que el valor absoluto del 2° término del binomio es menor que 1 en la ecuación (F.13), se puede hacer una expansión binomial basada en la expresión:

$$(1 - \epsilon)^{-1} = 1 + (-1)\epsilon + (-1)(-1+1)\epsilon^2/2! + (-1)(-1+1)(-1+2)\epsilon^3/3! + \dots \quad (\text{F.14})$$

la cual aplicada a (F.13), resulta en:

$$n_g \approx n_f \left(1 - \frac{\lambda}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right) \longrightarrow n_g \approx n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (\text{F.15})$$

Dado que $f = c\lambda^{-1}$, se puede derivar,

$$df = -\frac{c}{\lambda} \frac{d\lambda}{\lambda} = -f \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (\text{F.16})$$

y reordenando se tiene que:

$$\frac{df}{f} = -\frac{d\lambda}{\lambda} \quad (\text{F.17})$$

con esto se obtiene n_g en función de la frecuencia. Tomando la ecuación (F.13) y sustituyendo (F.17),

$$n_g \approx n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (\text{F.18})$$

que resulta en,

$$n_g \approx n_f + f \frac{dn_f}{df} \quad (\text{F.19})$$

(da Silva Picanço, 2019; Galera Monico, 2008)

En Seeber (2003); Galera Monico (2008) se menciona que el índice de refracción de fase ionosférico puede ser aproximado por la serie:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (\text{F.20})$$

donde los coeficientes $c_2, c_3, c_4, \dots$ dependen de la densidad de electrones por m^3 . Así que, si se consideran solamente los efectos de primer orden, se obtiene que:

$$n_f \approx 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (\text{F.21})$$

y al derivar (F.21)

$$dn_f = -2 \frac{c_2}{f^3} df \quad (\text{F.22})$$

Se sustituyen (F.21) y (F.22) en (F.19),

$$n_g = 1 + \frac{c_2}{f^2} + f \left(-\frac{2c_2}{f^3} \right) = 1 + \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_2}{f^2} = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (\text{F.23})$$

con este valor para $n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2}$, restando de (F.21):

$$n_f - n_g = 2 \frac{c_2}{f^2} \quad (\text{F.24})$$

se obtiene que:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (\text{F.25})$$

y

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (\text{F.26})$$

Para estimar el valor de c_2 se puede retomar el inicio de este capítulo usando la ecuación de dispersión (2.3) y las ecuaciones (F.1), (F.9), (F.2), (F.13) es posible obtener que:

$$f^2 = \frac{c^2}{\lambda^2} + f_p^2 \quad (\text{F.27})$$

de donde se desprende que:

$$\frac{c^2}{v_f^2} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad (\text{F.28})$$

despejando v_f ,

$$v_f = c \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (\text{F.29})$$

considerando $n_f = \frac{c}{v_f}$, se tiene que

$$n_f = \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{F.30})$$

La cual, aplicando la expansión binomial $(1 - \epsilon)^{1/2} = 1 - \epsilon/2 - \epsilon^2/8 - \epsilon^3/16 - \dots$

$$\left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 - \frac{1}{16} \left(\frac{f_p}{f} \right)^6 - \dots \quad (\text{F.31})$$

Tomando como base la ecuación (2.2), se puede expresar de la siguiente forma:

$$f_p = \left(\frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 m_e}} \right) \sqrt{N_e} \quad (\text{F.32})$$

la expresión $\frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 m_e}}$ se puede simplificar como:

$$\frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 m_e}} = 8.977957 s^{-1} \quad (\text{F.33})$$

De ahí que se pueda expresar f_p como:

$$f_p = 8.98 \sqrt{N_e} \quad (\text{F.34})$$

Aplicando este resultado en la ecuación obtenida previamente (F.30) se obtiene, aplicando la expansión binomial:

$$n_f = \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \quad (\text{F.35})$$

y sustituyendo el valor obtenido para f_p se tiene que el índice de refracción de fase se

puede expresar como:

$$n_f = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{8.98\sqrt{N_e}}{f} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{80.6404 \cdot N_e}{f^2} \right) = 1 - \frac{40.3202}{f^2} N_e \quad (\text{F.36})$$

que al final da una expresión para el índice de refracción ionosférico de fase con base en la densidad de electrones por metro cúbico y la frecuencia de la señal.

$$n_f = 1 - \frac{40.32}{f^2} \cdot N_e \quad (\text{F.37})$$

Analizando este resultado se puede concluir que de la expresión de Seeber (F.21) comparándolo con la expresión (F.31) se puede concluir que el segundo término c_2 tiene un valor de:

$$c_2 = -\frac{1}{2}f_p^2 = -\frac{1}{2}(8.98)^2 N_e = -40.32 N_e \quad (\text{F.38})$$

así que las relaciones (F.25) y (F.26) se expresan como:

$$n_g = 1 + \frac{40.32 \cdot N_e}{f^2} \quad (\text{F.39})$$

y

$$n_f = 1 - \frac{40.32 \cdot N_e}{f^2} \quad (\text{F.40})$$

(Galera Monico, 2008)

Estas expresiones permiten calcular la densidad electrónica de la ionósfera a partir de los índices de refracción estimados (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007).

El objetivo de este estudio es utilizar las señales GNSS (específicamente GPS) que atraviesan la ionósfera para calcular el retardo causado por la refracción en esta capa. El retardo ionosférico es un efecto de dispersión que afecta la propagación de las señales.

El Contenido Total de Electrones (TEC) es un parámetro clave en el estudio de la ionósfera y su impacto en las señales de radio. Se define como el número total de electrones libres presentes en una columna de un metro cuadrado a lo largo de la trayectoria entre el transmisor y el receptor (Mannucci *et al.*, 1998). El TEC se expresa como la integral de la

densidad de electrones a lo largo de dicha trayectoria:

$$TEC = \int N_e ds \quad (F.41)$$

donde N_e es la densidad de electrones y la integral se calcula a lo largo de la trayectoria de la señal. La unidad estándar de TEC es el TECU (Unidad de TEC), donde 1 TECU equivale a $10^{16} \text{electrones}/m^2$ (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

El TEC, como ya se ha mencionado antes, es fundamental para caracterizar la ionósfera y su variabilidad temporal y espacial, fluctuando con el ciclo solar, la hora del día, la estación y la ubicación geográfica. Además, el retardo que experimentan las señales de radio al atravesar la ionósfera es directamente proporcional al TEC, lo que lo convierte en un parámetro crítico para los sistemas de navegación por satélite (Komjathy, 2023).

Según las ecuaciones deducidas previamente, el retardo ionosférico es consecuencia de la dispersión de las ondas electromagnéticas al interactuar con el plasma ionosférico. Se define como la diferencia entre el tiempo de viaje de una señal a través de la ionósfera y el tiempo que tomaría en el vacío. Este retardo, proporcional al TEC e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, se expresa como:

$$\Delta t = \frac{40.32}{cf^2} TEC \quad (F.42)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y f es la frecuencia de la señal (Klobuchar, 1996; Davies, 1990).

El retardo ionosférico está directamente relacionado con la línea de visión entre el satélite y el receptor, por lo que debe manejarse adecuadamente para obtener resultados generalizables. Los valores obtenidos deben corregirse para eliminar las contribuciones de la localización, desfases de relojes y condiciones meteorológicas locales (Klobuchar, 1996; Galdyn *et al.*, 2023; da Silva Picanço, 2019).

El TEC representa la cantidad de electrones libres por metro cuadrado a lo largo de la línea de visión satélite-receptor. Dado que el ángulo cenital de los satélites cambia constantemente debido a su movimiento orbital, para generar mapas bidimensionales de la ionósfera, el TEC debe ser convertido a VTEC (TEC Vertical). El STEC (del inglés:

TEC Inclinado) es la componente oblicua del TEC que describe la variación de electrones libres a lo largo de la trayectoria satélite-receptor.

Considerando todo lo mencionado es posible simplificar la expresión del retardo ionosférico en cualquier punto del trayecto de los satélites GPS al receptor dado:

$$I_k^i = \frac{40.32}{f^2} STEC \quad (F.43)$$

donde I_k^i es el retardo ionosférico en la trayectoria satélite-receptor y f es la frecuencia de la señal modulada.

Volver a la secuencia principal a la sección 2.6

Apéndice G

Datos de Actividad Solar

A continuación se muestran las tablas de actividad solar de los años 2020, 2022 y 2024 que se tomaron en cuenta como los días requeridos para el estudio. Se consideran días *quietos* aquellos cuyo Kp es menor a 24 y los días *perturbados* los que el Kp es mayor a 24.

Estas fechas fueron seleccionadas de los sitios:

- <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/>
- https://isgi.unistra.fr/data_download.php

Cuadro G.1: 120 fechas de 2020. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo.

Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol
05/01/2020	15.67	65	quiet
06/01/2020	14	63	quiet
09/01/2020	19.67	88	quiet
13/01/2020	3.33	17	quiet
14/01/2020	2.33	13	quiet
19/01/2020	1	5	quiet
20/01/2020	0.67	4	quiet
24/01/2020	2.33	12	quiet
29/01/2020	15	65	quiet
30/01/2020	20.33	92	quiet
06/02/2020	22.33	120	quiet
07/02/2020	22	107	quiet
13/02/2020	3.33	16	quiet
14/02/2020	3.67	15	quiet
16/02/2020	4.33	19	quiet
18/02/2020	20.67	101	quiet
19/02/2020	19	94	quiet
21/02/2020	21.33	105	quiet
25/02/2020	3.33	16	quiet
27/02/2020	5	22	quiet
05/03/2020	6.33	26	quiet
10/03/2020	6.67	27	quiet
11/03/2020	4.33	20	quiet
14/03/2020	3.67	17	quiet
19/03/2020	17.33	81	quiet
21/03/2020	15.33	60	quiet
23/03/2020	19.66	88	quiet
25/03/2020	5.67	23	quiet
30/03/2020	18	91	quiet
31/03/2020	22.33	115	quiet
03/04/2020	14	62	quiet
06/04/2020	3.67	16	quiet
08/04/2020	21	101	quiet
14/04/2020	13	56	quiet
19/04/2020	1.67	9	quiet
20/04/2020	21	127	quiet
21/04/2020	16	67	quiet
23/04/2020	5.67	25	quiet
29/04/2020	3.67	18	quiet
30/04/2020	2	10	quiet
05/05/2020	11.33	42	quiet
06/05/2020	8	39	quiet
09/05/2020	2	11	quiet
14/05/2020	2.66	16	quiet
17/05/2020	3.33	16	quiet
20/05/2020	4	19	quiet
22/05/2020	11.33	43	quiet
25/05/2020	10	38	quiet
28/05/2020	4	19	quiet
30/05/2020	23.67	118	quiet
02/06/2020	13	52	quiet
06/06/2020	3.67	18	quiet
07/06/2020	12.67	58	quiet
10/06/2020	13	50	quiet
14/06/2020	3	14	quiet
22/06/2020	3.33	17	quiet
25/06/2020	4.33	21	quiet
26/06/2020	10	42	quiet
27/06/2020	12.33	50	quiet
29/06/2020	3.33	17	quiet

Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol
04/07/2020	13	53	quiet
05/07/2020	17.33	76	quiet
08/07/2020	2.67	15	quiet
10/07/2020	3	15	quiet
11/07/2020	3.67	18	quiet
12/07/2020	2.67	14	quiet
14/07/2020	15.33	81	quiet
23/07/2020	4	20	quiet
24/07/2020	20	93	quiet
25/07/2020	20	96	quiet
02/08/2020	16	76	quiet
03/08/2020	24.33	123	disturbed
09/08/2020	3	16	quiet
10/08/2020	3	16	quiet
11/08/2020	3	15	quiet
15/08/2020	2.67	14	quiet
24/08/2020	3.33	16	quiet
28/08/2020	14	77	quiet
29/08/2020	21	99	quiet
31/08/2020	30	196	disturbed
01/09/2020	25.33	140	disturbed
09/09/2020	1	5	quiet
10/09/2020	2.33	12	quiet
11/09/2020	3.33	15	quiet
19/09/2020	3.67	16	quiet
21/09/2020	3	15	quiet
24/09/2020	23.67	162	quiet
26/09/2020	29	191	disturbed
27/09/2020	24	161	quiet
28/09/2020	34	259	disturbed
08/10/2020	3.33	17	quiet
09/10/2020	0.67	4	quiet
10/10/2020	1.33	6	quiet
14/10/2020	0	0	quiet
15/10/2020	2	9	quiet
23/10/2020	17	110	quiet
24/10/2020	24.67	135	disturbed
25/10/2020	22	111	quiet
26/10/2020	23	114	quiet
29/10/2020	19.33	94	quiet
01/11/2020	14.33	64	quiet
02/11/2020	2.67	12	quiet
04/11/2020	2.67	15	quiet
09/11/2020	0	0	quiet
10/11/2020	0.67	4	quiet
16/11/2020	0.67	4	quiet
21/11/2020	17.33	80	quiet
22/11/2020	30	194	disturbed
23/11/2020	15.33	58	quiet
28/11/2020	17	74	quiet
01/12/2020	2.33	11	quiet
04/12/2020	0.33	2	quiet
07/12/2020	2.33	11	quiet
17/12/2020	1.33	7	quiet
18/12/2020	2.33	13	quiet
21/12/2020	19.67	97	quiet
22/12/2020	22	105	quiet
23/12/2020	18.66	91	quiet
24/12/2020	15.33	65	quiet
30/12/2020	15	60	quiet

Cuadro G.2: 120 fechas de 2022. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo.

Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol
06/01/2022	0.33	2	quiet
07/01/2022	0	0	quiet
12/01/2022	5.33	22	quiet
13/01/2022	4	18	quiet
15/01/2022	26.33	162	disturbed
16/01/2022	24.33	129	disturbed
18/01/2022	24.33	139	disturbed
19/01/2022	26.67	181	disturbed
24/01/2022	6.33	26	quiet
29/01/2022	20	116	quiet
03/02/2022	29.33	212	disturbed
04/02/2022	33.67	256	disturbed
08/02/2022	8.33	33	quiet
09/02/2022	3	13	quiet
10/02/2022	26	169	disturbed
11/02/2022	25.33	152	disturbed
15/02/2022	7.33	30	quiet
17/02/2022	9	35	quiet
22/02/2022	21.33	126	quiet
26/02/2022	1	5	quiet
02/03/2022	6.33	27	quiet
03/03/2022	8.33	34	quiet
05/03/2022	29	213	disturbed
06/03/2022	23.67	145	quiet
11/03/2022	27	158	disturbed
13/03/2022	29.33	321	disturbed
18/03/2022	4.33	18	quiet
19/03/2022	9	35	quiet
21/03/2022	5.67	24	quiet
31/03/2022	30.33	211	disturbed
02/04/2022	26	159	disturbed
05/04/2022	12	44	quiet
06/04/2022	11.33	45	quiet
09/04/2022	24	133	quiet
10/04/2022	27	233	disturbed
14/04/2022	35.67	313	disturbed
15/04/2022	28.33	187	disturbed
24/04/2022	9.67	36	quiet
25/04/2022	7.33	29	quiet
26/04/2022	3.67	17	quiet
05/05/2022	6.33	26	quiet
07/05/2022	2.33	11	quiet
10/05/2022	4.33	18	quiet
17/05/2022	18.67	83	quiet
20/05/2022	19	85	quiet
24/05/2022	6	25	quiet
26/05/2022	7.33	30	quiet
27/05/2022	21	141	quiet
28/05/2022	24.33	175	disturbed
29/05/2022	24.33	124	disturbed
02/06/2022	7.33	30	quiet
03/06/2022	6.67	28	quiet
04/06/2022	4.33	21	quiet
05/06/2022	7	29	quiet
13/06/2022	20.67	108	quiet
15/06/2022	23.67	133	quiet
17/06/2022	21.66	99	quiet
25/06/2022	21.33	118	quiet
26/06/2022	27.67	177	disturbed
30/06/2022	5.67	25	quiet

Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol
04/07/2022	26.67	150	disturbed
05/07/2022	4.33	21	quiet
06/07/2022	7	28	quiet
07/07/2022	22	155	quiet
08/07/2022	24.67	154	disturbed
14/07/2022	7	29	quiet
17/07/2022	6.67	28	quiet
19/07/2022	31.33	213	disturbed
21/07/2022	23	158	quiet
29/07/2022	6.67	28	quiet
06/08/2022	4.67	22	quiet
07/08/2022	26.33	186	disturbed
08/08/2022	30.67	212	disturbed
09/08/2022	26.67	153	disturbed
17/08/2022	27	259	disturbed
18/08/2022	30.33	225	disturbed
23/08/2022	4.67	21	quiet
24/08/2022	4	19	quiet
25/08/2022	5.33	23	quiet
26/08/2022	6.33	27	quiet
03/09/2022	28.33	179	disturbed
04/09/2022	43.33	495	disturbed
05/09/2022	36	292	disturbed
06/09/2022	27	154	disturbed
13/09/2022	4.33	19	quiet
16/09/2022	7.67	31	quiet
17/09/2022	8	32	quiet
21/09/2022	8.67	34	quiet
27/09/2022	26.67	180	disturbed
28/09/2022	6.67	27	quiet
01/10/2022	3.67	17	quiet
03/10/2022	27.67	193	disturbed
04/10/2022	23.33	135	quiet
09/10/2022	29.67	184	disturbed
13/10/2022	6.67	28	quiet
19/10/2022	7	29	quiet
21/10/2022	7.33	30	quiet
22/10/2022	27.33	189	disturbed
25/10/2022	6	24	quiet
29/10/2022	30	198	disturbed
03/11/2022	29.67	212	disturbed
06/11/2022	4.33	21	quiet
10/11/2022	0.33	2	quiet
15/11/2022	3.33	18	quiet
17/11/2022	2	9	quiet
22/11/2022	3.67	18	quiet
25/11/2022	26	143	disturbed
28/11/2022	25.67	176	disturbed
29/11/2022	27	156	disturbed
30/11/2022	28.67	194	disturbed
01/12/2022	30	193	disturbed
06/12/2022	6	25	quiet
13/12/2022	5	22	quiet
14/12/2022	8	31	quiet
17/12/2022	3.67	16	quiet
18/12/2022	6.33	27	quiet
23/12/2022	27	165	disturbed
24/12/2022	28.66	175	disturbed
27/12/2022	29.33	193	disturbed
30/12/2022	32.33	229	disturbed

Cuadro G.3: 120 fechas de 2024. 60 fechas con Sol perturbado $Kp > 24$ y 60 fechas de Sol calmo.

Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol	Fechas	Suma Kp	Suma Ap	Activ. Sol
01/01/2024	15.33	80	quiet	02/07/2024	8	32	quiet
02/01/2024	15.33	62	quiet	06/07/2024	4	20	quiet
03/01/2024	18.67	85	quiet	08/07/2024	18.33	77	quiet
06/01/2024	3	13	quiet	13/07/2024	6	26	quiet
07/01/2024	1	6	quiet	18/07/2024	7	29	quiet
08/01/2024	5.33	21	quiet	19/07/2024	7	29	quiet
13/01/2024	3.67	18	quiet	26/07/2024	29	192	disturbed
17/01/2024	6	26	quiet	27/07/2024	17.33	82	quiet
24/01/2024	13.33	65	quiet	30/07/2024	26.67	177	disturbed
29/01/2024	15	58	quiet	31/07/2024	19.67	118	quiet
02/02/2024	4	19	quiet	04/08/2024	36.67	395	disturbed
03/02/2024	2.33	12	quiet	06/08/2024	9.67	37	quiet
11/02/2024	21.33	110	quiet	11/08/2024	30.67	226	disturbed
13/02/2024	16.67	71	quiet	12/08/2024	54.67	1019	disturbed
15/02/2024	6	26	quiet	15/08/2024	8.67	34	quiet
19/02/2024	1	6	quiet	17/08/2024	24.33	236	disturbed
23/02/2024	4.33	19	quiet	25/08/2024	10.33	40	quiet
25/02/2024	19.33	83	quiet	26/08/2024	7	29	quiet
26/02/2024	18	77	quiet	29/08/2024	9.33	36	quiet
27/02/2024	17.67	99	quiet	31/08/2024	29.67	200	disturbed
03/03/2024	28	271	disturbed	03/09/2024	11	41	quiet
11/03/2024	7.67	30	quiet	05/09/2024	8.33	33	quiet
16/03/2024	2.33	12	quiet	12/09/2024	42.34	569	disturbed
17/03/2024	0.33	2	quiet	13/09/2024	34	280	disturbed
20/03/2024	7.33	30	quiet	16/09/2024	26.33	153	disturbed
21/03/2024	27.67	176	disturbed	17/09/2024	43	569	disturbed
23/03/2024	32.67	251	disturbed	20/09/2024	8.33	40	quiet
24/03/2024	39.67	544	disturbed	21/09/2024	11	41	quiet
25/03/2024	28.67	197	disturbed	22/09/2024	9.67	37	quiet
30/03/2024	6.67	26	quiet	25/09/2024	33	235	disturbed
12/04/2024	9.67	38	quiet	01/10/2024	10.67	40	quiet
14/04/2024	10	37	quiet	02/10/2024	11.67	43	quiet
16/04/2024	33	251	disturbed	07/10/2024	40.67	433	disturbed
18/04/2024	6	26	quiet	08/10/2024	38.67	436	disturbed
19/04/2024	34.67	362	disturbed	10/10/2024	37	773	disturbed
21/04/2024	26	143	disturbed	11/10/2024	48	927	disturbed
24/04/2024	4.67	22	quiet	13/10/2024	7.33	29	quiet
25/04/2024	3	14	quiet	19/10/2024	29.33	198	disturbed
26/04/2024	23	138	quiet	21/10/2024	9.67	37	quiet
30/04/2024	18	103	quiet	25/10/2024	3.33	16	quiet
02/05/2024	32	339	disturbed	02/11/2024	17.67	92	quiet
04/05/2024	8.33	38	quiet	04/11/2024	20.33	106	quiet
09/05/2024	10.33	40	quiet	09/11/2024	33.67	249	disturbed
10/05/2024	38.34	841	disturbed	10/11/2024	28	198	disturbed
11/05/2024	67	2166	disturbed	12/11/2024	9	35	quiet
12/05/2024	36.67	423	disturbed	15/11/2024	21	95	quiet
13/05/2024	28	214	disturbed	18/11/2024	7.33	29	quiet
22/05/2024	6	25	quiet	26/11/2024	10.33	44	quiet
25/05/2024	11	42	quiet	27/11/2024	8	33	quiet
28/05/2024	8.34	33	quiet	28/11/2024	5.33	22	quiet
07/06/2024	27.33	235	disturbed	09/12/2024	24.67	132	disturbed
08/06/2024	21.34	110	quiet	13/12/2024	6.33	25	quiet
12/06/2024	7.33	30	quiet	17/12/2024	30.67	225	disturbed
13/06/2024	4.33	20	quiet	18/12/2024	22	114	quiet
15/06/2024	24.33	136	disturbed	20/12/2024	20.33	101	quiet
16/06/2024	21	110	quiet	21/12/2024	23.33	115	quiet
21/06/2024	6	26	quiet	26/12/2024	1.66	10	quiet
22/06/2024	5.33	24	quiet	27/12/2024	4.33	20	quiet
24/06/2024	6.33	27	quiet	28/12/2024	5.67	24	quiet
28/06/2024	40	480	disturbed	29/12/2024	8.33	33	quiet

Apéndice H

Nociones de los Archivos RINEX

Los archivos RINEX fueron desarrollados en 1989 por la Universidad de Berna, Suiza, como parte del proyecto de la Red de Seguimiento GPS de la Agencia Espacial Europea (ESA). El propósito principal era facilitar el intercambio de datos GPS recopilados durante la primera gran campaña europea de GPS, EUREF89, en la cual participaron más de 60 receptores de distintos fabricantes (Gurtner y Estey, 2007). Estos archivos contienen registros de las observaciones transmitidas por los satélites de los sistemas GNSS, que incluyen todas las constelaciones de navegación mencionadas previamente (Gurtner, 2009).

Este formato se ha consolidado como el estándar internacional para el almacenamiento y el intercambio de datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). RINEX permite almacenar de manera eficiente y precisa tanto los datos GNSS como sus metadatos asociados en un formato legible por humanos, facilitando su transferencia y distribución, sin importar el equipo utilizado para su captura o el software empleado en su procesamiento. El formato define tres tipos principales de archivos: observación, navegación y datos meteorológicos (Janssen, 2024).

Con el tiempo, RINEX ha evolucionado para satisfacer los crecientes requerimientos de precisión demandados por tecnologías emergentes y aplicaciones en diversos campos. Aunque la versión más reciente es la 4.01, la versión 2.11, aún sigue siendo muy utilizada, esta versión es suficiente para los fines del presente estudio (ver tabla H.1). La EUREF hace un análisis más detallado de las versiones más actuales (ver tabla H.2).

Estructura de los archivos RINEX

Los archivos RINEX se utilizan ampliamente en aplicaciones geodésicas, de navegación, y científicas que requieren el análisis de datos GNSS. Los principales usos incluyen:

- **Posicionamiento Geodésico y Preciso:** Los archivos RINEX contienen datos de observación que permiten realizar cálculos de posicionamiento con alta precisión,

Versión	Año	Características Clave	Uso Aprox. (%)
2.11	2007	Soporte para GPS y GLONASS; simplicidad y compatibilidad	40-50 %
3.03	2015	Compatibilidad con múltiples constelaciones (Galileo, BeiDou, QZSS)	20-30 %
3.04	2018	Mejoras en manejo de señales multibanda	15-25 %
4.00	2021	Última versión; soporte para nuevos sistemas GNSS y mayor precisión	5-15 %

Cuadro H.1: Popularidad Estimada de las Versiones de RINEX (igs.org).

esenciales en geodesia y topografía.

- **Investigación Científica:** Se utilizan en investigaciones sobre la ionósfera, la atmósfera, y estudios de tectónica de placas, donde se requiere un análisis detallado de las señales GNSS.
- **Monitoreo de Satélites:** Ayudan a monitorizar la posición y el estado de los satélites GNSS en tiempo real y a largo plazo.

Un archivo RINEX puede contener varios tipos de datos. Por ello originalmente existen tres tipos de archivos RINEX, que se clasifican por el tipo de información que proporcionan (Langley, 2007):

- **Archivos de Observación:** Contienen mediciones crudas de los diferentes parámetros también llamados *Observables*, mencionamos algunos de ellos:
 - **Fase portadora:** Representa la cuenta de ciclos o fases completas más la fracción complementaria de la señal desde que sale de la antena del satélite hasta la antena del receptor GNSS.
 - La longitud de onda de la onda portadora se usa como unidad de medición de este valor. Las más usadas, y son las que se aplicarán en este análisis, son L1 y L2. L1 tiene una frecuencia central de 1575.42 MHz (y una longitud de onda de aproximadamente 19 cm), L2 tiene una frecuencia central de 1227.60 MHz (longitud de onda de aproximadamente 24.4 cm).
 - Como se mencionó, la fase de la portadora se mide en ciclos de la señal, y en un archivo RINEX, se registra como valores fraccionarios en términos de longitudes de onda completas.
 - Esto permite obtener una medición extremadamente precisa de la distancia entre el satélite y el receptor, dado que las longitudes de onda son mucho más pequeñas que los errores asociados al código C/A del inglés *Coarse Acquisition Code* (C/A-Code), que se usa en los pseudorangs. La distancia medida con la fase de la portadora está relacionada con el número total de

Versión	Año	Uso (%)	Comentario
1.0	1989	<1	Versión original, solo datos de posicionamiento estático. Obsoleta.
2.0	1990	~2	Añade soporte para varios sistemas satelitales. Base de subversiones hasta 2.11.
2.11	2007	5–10	Estándar de RINEX 2, aún usada en sistemas antiguos y algunas redes GNSS.
3.00	2007	~5	Soporte inicial multi-GNSS, experimental en su lanzamiento.
3.01	2008	~5	Mejoras en multi-GNSS, aún experimental.
3.02	2012	20–25	Estándar ampliamente adoptado para multi-GNSS. Soporta GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou, SBAS.
3.03	2015	10–15	Actualización menor, considerado estándar junto con 3.02.
3.04	2018	10–15	Mejoras y clarificaciones, estándar junto a 3.02 y 3.03.
3.05	2020	20–25	Última versión 3.x, soporte completo para BeiDou BDS-2 y BDS-3, mejoras en navegación.
4.00	2021	2–5	Revisión mayor, optimizada para navegación multi-GNSS moderna, adopción creciente.
4.01	2024	<2	Última actualización, emergente en adopción.

Cuadro H.2: Evolución histórica de las versiones RINEX, uso actual estimado y comentarios. Datos obtenidos de EUREF.

ciclos de la señal multiplicado por la longitud de onda:

$$D = N_{ph} \cdot \lambda + \phi \quad (\text{H.1})$$

donde D es la distancia estimada, N_{ph} es el número entero de ciclos completos (ambigüedad de fase), λ es la longitud de onda de la señal (diferente para L1, L2, etc.) y ϕ es la fracción de ciclo de fase restante observada por el receptor.

- En un archivo RINEX de tipo de observación, cada dato de fase se registra con la misma estructura que las observaciones de pseudorango, con una línea para cada satélite en cada época (*epoch*). Las observaciones de fase pueden combinarse con las de pseudorango para calcular la distancia entre el receptor y los satélites con mayor precisión y para resolver la ambigüedad de fase (Gurtner y Estey, 2007).
- **Pseudorango:** Es uno de los principales observables que se registran en un archivo RINEX de observación. Se define como la distancia aparente entre el receptor GNSS y el satélite, calculada a partir del tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite hasta el receptor.
 - A diferencia del rango o distancia verdadera (o geométrica), el pseudorango incluye diversos errores y retrasos que afectan la señal, como los

causados por la ionósfera, la troposfera, el reloj del satélite y el reloj del receptor.

- La simbología de este observable inició como P (P1, P2,...) y en posteriores versiones se usa también C (C1, C2,...). Los pseudorangos se etiquetan de acuerdo con las frecuencias y los códigos de las señales GNSS observadas.
- Los códigos más comunes son: C1 o P1 para el Pseudorango en la frecuencia L1 de GPS, P2 como Pseudorango en la frecuencia L2 de GPS, C1C para el Pseudorango en código C/A en la frecuencia L1 para GPS y C2C Pseudorango en código C/A en la frecuencia L2 para Galileo.
- Como un cálculo básico, el pseudorango se calcula multiplicando el tiempo de viaje de la señal por la velocidad de la luz. El tiempo de viaje se estima utilizando la diferencia entre el tiempo de emisión de la señal en el satélite y el tiempo de recepción registrado en el receptor GNSS.

$$P_n = c \cdot (T_{rec} - T_{sat}) \quad (H.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, P_n es el pseudorango de la señal L_n , T_{rec} es el tiempo del reloj del receptor de la llegada de la señal y T_{sat} es el tiempo del reloj del satélite cuando la señal salió del mismo.

- El pseudorango observado (P_n) puede representarse matemáticamente como:

$$P_n = R + c \cdot (\Delta t_{rec} - \Delta t_{sat}) + I + T + \epsilon \quad (H.3)$$

donde R es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, c es la velocidad de la luz, Δt_{sat} es el error del reloj del satélite, Δt_{rec} es el error del reloj del receptor, I es el retraso ionosférico, T el retraso troposférico y ϵ otros errores como el ruido térmico y la multi-trayectoria (Gurtner y Estey, 2007).

- **SNR:** Es una medida de la calidad de la señal recibida del satélite. Se expresa como la relación entre la señal y el ruido en decibelios-hertz (dB-Hz).
 - Se representa con la letra S (S1, S2,...) el número es para la frecuencia de la señal con la que se relaciona.
 - Los valores típicos de C/N_0 (*Carrier-To-Noise*) oscilan entre 30 y 50 dB-Hz para señales GNSS en condiciones normales. Un valor más bajo de C/N_0 indica una señal más débil con respecto al ruido de fondo, mientras que un valor más alto indica una relación señal a ruido más fuerte.
 - Se suele usar este parámetro para evaluar la calidad de los datos del archivo RINEX o del un satélite en particular o del receptor para depurar la información y así obtener resultados más confiables y precisos (Gurtner y Estey, 2007).
 - Existe un valor intercalado en las columnas de datos relacionado con cada valor de S_x ya que se encuentra relacionado con su observable respectivo: L_x , P_x o C_x , incluso con D_x . Este valor se le encuentra en el lugar del quinto decimal del observable (el cuarto y quinto lugares de los “decimales” de

las columnas de datos NO son decimales, son códigos específicos, actúan como columnas de un solo dígito) y se calcula con un algoritmo simple que normalmente se describe los comentarios del HEADER del archivo RINEX. El comentario dice: “SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9], L1 & L2: $\min(\max(\text{int}(\text{snr}_d \text{BHz}/6), 0), 9)$ ”. Este valor específico toma el valor de S1, S2, S5,... y lo convierte en un índice de 0 a 9 en donde va desde 0, donde tenemos una señal mínimamente útil, hasta 9, donde da el indicador más óptimo para la señal.

- **Doppler:** El observable Doppler en los archivos RINEX de observación es uno de los parámetros clave que permite medir la variación en la frecuencia de la señal GNSS debido al movimiento relativo entre el satélite y el receptor.
 - Se representa con la letra D (D1, D2,...) el número se asocia con la frecuencia de la señal a la que hace referencia.
 - El valor de este observable puede ser positivo o negativo. Cuando es positivo significa que el satélite se aproxima al receptor.
 - Estos valores se miden en ciclos por segundo (Hz), y están directamente relacionados con la velocidad relativa del satélite respecto al receptor.
 - Este valor se puede utilizar para estimar la velocidad relativa del receptor GNSS con el satélite en cuestión. El valor Doppler indica si el satélite se está acercando o alejando del receptor y en qué magnitud y dirección. Ello permite estimar la velocidad y dirección del movimiento del receptor en tres dimensiones.
 - Es posible utilizar el valor de la desviación de la frecuencia para añadirlo al proceso del cálculo del TEC (o en el caso común del posicionamiento) para aumentar la precisión de los cálculos.
- **Archivos de Navegación:** Incluyen los datos de los mensajes de navegación transmitidos por los satélites entre los que podemos mencionar:
 - **Identificación del satélite (PRN):** Número que identifica de manera única al satélite dentro de su constelación. Este valor varía según el sistema (GPS, GLONASS, Galileo, etc.).
 - **Tiempo de referencia del satélite (Toc):** Es el tiempo de referencia del reloj del satélite. Indica el tiempo en el que los parámetros del reloj del satélite son válidos. Generalmente se expresa en segundos del Sistema de Tiempo GPS (*GPS Time*).
 - **Parámetros del reloj del satélite:**
 - **Bias del reloj del satélite (a0):** Desviación inicial del reloj del satélite en segundos.
 - **Velocidad de cambio del reloj del satélite (a1):** Tasa de cambio del bias en segundos por segundo.
 - **Velocidad de cambio del a1 (a2):** Tasa de cambio del desfase del reloj en segundos por segundo al cuadrado.

-
- **Datos de efemérides (órbita satelital):**
 - **Semieje mayor corregido ($\sqrt{A}$):** La raíz cuadrada del semieje mayor de la órbita, que es un parámetro clave para describir el tamaño de la órbita del satélite.
 - **Excentricidad (e):** Magnitud de la excentricidad de la órbita del satélite.
 - **Inclinación orbital (i_0):** Ángulo de inclinación de la órbita con respecto al plano ecuatorial.
 - **Argumento del perigeo (ω):** Ángulo entre el nodo ascendente y el perigeo de la órbita.
 - **Longitud del nodo ascendente (Ω_0):** Posición del nodo ascendente en el momento de referencia.
 - **Tasa de cambio de la longitud del nodo ($\dot{\Omega}$):** Cambio de la longitud del nodo ascendente a lo largo del tiempo.
 - **Anomalía media (M_0):** Describe la posición del satélite en su órbita elíptica en el momento de referencia.
 - **Correcciones de la inclinación (i):** Tasa de cambio de la inclinación orbital.
 - **Corrección ionosférica:** Algunos sistemas GNSS (ver Apéndice A), como GPS, transmiten parámetros de corrección ionosférica (modelo Klobuchar), que se utilizan para corregir los efectos de la ionósfera sobre las señales GNSS. Este modelo se usaba con los satélites de frecuencia única.
 - **Parámetros de salud del satélite:** Indican el estado de funcionamiento del satélite y si está operando dentro de las especificaciones, o si tiene algún problema que afecte su precisión o disponibilidad.
 - **Tiempo de transmisión (T_t)** Momento en el que la señal fue transmitida por el satélite, lo que permite al receptor GNSS calcular el tiempo de viaje de la señal y, por lo tanto, la distancia al satélite.
 - **Corrección del tiempo GPS al Tiempo del Sistema Universal Coordinado (UTC):** Proporciona las diferencias entre el tiempo GPS y el UTC, que son necesarias para corregir las lecturas de tiempo en los sistemas de navegación. (Kaplan y Hegarty, 2017)
 - **Archivos Meteorológicos:** Los receptores equipados recogen datos meteorológicos (opcionales) que pueden ser relevantes para el análisis GNSS sobre todo si la refracción troposférica es relevante.
 - **Presión atmosférica (PRES):** Su unidad viene hectopascales (hPa). La presión atmosférica es uno de los elementos que afecta la refracción de las señales GNSS en la tropósfera. Una mayor presión puede causar mayor retraso troposférico, lo que afecta la precisión de la señal y el cálculo de la posición.
 - **Temperatura (TEMP):** Su unidad se maneja con grados ($^{\circ}C$). La temperatura del aire es importante para determinar el comportamiento de la atmósfera y su

efecto en las señales GNSS. La variación de temperatura afecta la densidad del aire, lo que a su vez influye en el índice de refracción de las señales que viajan a través de la atmósfera.

- **Humedad relativa (HUMI):** Valor dado en porcentaje (%). La humedad relativa mide la cantidad de vapor de agua en el aire. El vapor de agua contribuye al retraso troposférico, ya que las señales GNSS viajan a una velocidad diferente en aire húmedo comparado con aire seco. Las áreas con alta humedad suelen tener un mayor retraso troposférico.
- **Otros parámetros:** Velocidad del viento (WIND) (m/s), dirección del viento (WDIR) ($^{\circ}$ Azimut), Precipitación (PREC) (mm), altura sobre el nivel del mar (ALT) (m).

Apéndice I

Combinaciones Lineales

Las combinaciones lineales se forman utilizando mediciones de diferencia cero o doble. L_1, L_2 representan los observables de fase (diferencias cero o dobles), P_1, P_2 representan los observables de código, ambos en unidades de metros (Dach *et al.*, 2015).

La nomenclatura Bernese y de muchos otros autores utiliza para las 4 combinaciones lineales más conocidas las expresiones: L_3, L_4, L_5 y L_6 sin embargo, en versiones más genéricas se utiliza otra notación usando Φ_3, Φ_4, Φ_5 y Φ_6 . En este trabajo se usa la primera notación para denotar las combinaciones lineales.

Combinación libre de ionósfera L3

Esta combinación elimina el primer orden del efecto de la ionósfera, ya que la velocidad de propagación de las señales GNSS se ve afectada por esta capa, especialmente por la densidad de electrones. Aplica de forma análoga para la fase portadora (ecuación (I.3)), como para el pseudorango (ecuación (I.4)). Esta combinación es más útil en el tema del posicionamiento global (Misra, 2006).

Si se toma en cuenta las medidas de fase con doble diferencia y despreciando la refracción troposférica $\Delta\varrho_{kl}^{ij}$, de las ecuaciones (2.27), (2.28), (2.25) y (2.26), la combinación libre de ionósfera toma la forma:

$$L_{3kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} + B_{3kl}^{ij}, \quad (\text{I.1})$$

donde B_{3kl}^{ij} es el sesgo libre de ionósfera que puede representarse como:

$$B_{3kl}^{ij} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 n_{1kl}^{ij} - f_2^2 \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (\text{I.2})$$

donde los términos n_{1kl}^{ij} y n_{2kl}^{ij} son las respectivas ambigüedades para los pares de estaciones combinadas k, l con los satélites i, j . Como no es posible expresar en la forma $\lambda_3 n_{3kl}^{ij}$ donde n_{3kl}^{ij} es una ambigüedad entera,

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (\text{I.3})$$

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) \quad (\text{I.4})$$

Combinación libre de geometría L4

Esta combinación (I.5) es independiente de los relojes del receptor, los relojes del satélite y la geometría (órbitas, coordenadas de la estación). Solo contiene el retardo ionosférico y las ambigüedades de la fase inicial y puede utilizarse para la estimación de modelos de ionósfera. La misma combinación lineal también (I.6) puede formarse utilizando las observaciones del código (pseudorango) (Dach *et al.*, 2015). Esta combinación se usa principalmente para calcular el contenido total de electrones (TEC) en la ionósfera, ya que la diferencia de fase entre las dos frecuencias es proporcional a la cantidad de electrones a lo largo del camino de la señal (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007).

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (\text{I.5})$$

$$P_4 = P_1 - P_2 \quad (\text{I.6})$$

Combinación *Wide Lane* L5

La combinación *wide-lane* es útil para resolver ambigüedades de fase. Esta combinación permite la resolución de las ambigüedades de ciclo entero debido a que genera una frecuencia combinada más baja, lo que facilita la solución de ambigüedades en la observación de fase. Esta combinación reduce la frecuencia efectiva, lo que aumenta la longitud de onda combinada (aproximadamente 86 cm) y hace más sencillo resolver las ambigüedades (Dach *et al.*, 2015; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007).

$$L_5 = \frac{1}{f_2 - f_1} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (\text{I.7})$$

Combinación Melbourne-Wübbena L6

La combinación Melbourne-Wübbena es una combinación lineal de los observables de la fase portadora (L1 y L2) y del código (P1 y P2), tal como lo describen Wübbena (1985) y Melbourne (1985). Esta combinación elimina el efecto de la ionósfera, la geometría, los relojes y la tropósfera.

$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2) \quad (\text{I.8})$$

Apéndice J

Perfiles de errores por hora/año para cada latitud

Aquí mostramos 14 gráficos, 7 de ellos de errores *GAPS* y los otros 7 de *CYCLE-SLIPS* de cada una de las 7 estaciones del estudio que representan las distintas latitudes geomagnéticas.

La tabla Tabla J.1 permite acceder a cada uno de los gráficos. Cada hora local de cada gráfica tiene tres columnas que representan los 3 años del estudio. Se puede observar en detalle el comportamiento de cada latitud.

Observar el comportamiento de 2024 de MANA en los *CYCLE-SLIPS* de 2024. Valdría la pena en un trabajo posterior repetir el cálculo de los errores con el año intermedio para entender mejor este cambio, cuándo fue y poder discriminar ese cambio tan drástico de valor. Parecería indicar, al menos, que no es de índole ionosférica.

En el caso de QUI3 se puede observar en 2022 en el gráfico de los *CYCLE-SLIPS* un valor incrementado que no tiene una explicación simple, por ello sería positivo la repetición de este proceso con los años intermedios 2021 y 2023. Quizás también lo que se puede afirmar es que no parece ser de origen ionosférico.

En el caso de APMA el gráfico que sobresale es el de *CYCLE-SLIPS* con ese pico vespertino de 2024 más exagerado que los años anteriores. Refuerza nuestra hipótesis del efecto del ciclo solar sobre los *CYCLE-SLIPS*.

El mismo caso se observa en TOPL y POAL. No así en MBIO que también presenta como MANA un cambio exagerado durante todas las horas del día el año 2024. Caso que puede ser estudiado con más datos en estudios posteriores.

Estación	Latitud	Perfil <i>GAPS</i>	Perfil <i>SLIPS</i>
PTEX	60°	Figura J.1	Figura J.2
MANA	40°	Figura J.3	Figura J.4
QUI3	20°	Figura J.5	Figura J.6
APMA	0°	Figura J.7	Figura J.8
TOPL	−20°	Figura J.9	Figura J.10
POAL	−40°	Figura J.11	Figura J.12
MBIO	−60°	Figura J.13	Figura J.14

Cuadro J.1: Tabla de gráficos con perfiles de errores *GAPS* y *CYCLE-SLIPS* por hora por año por estación.

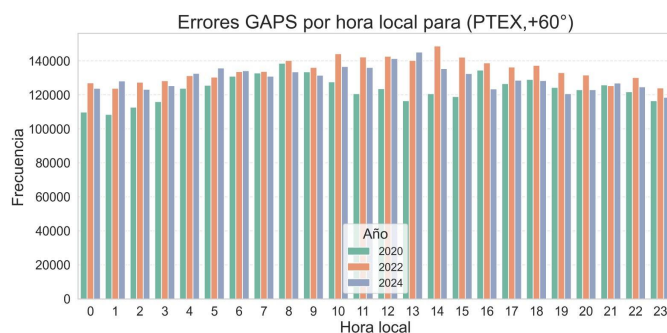


Figura J.1: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para PTEX.

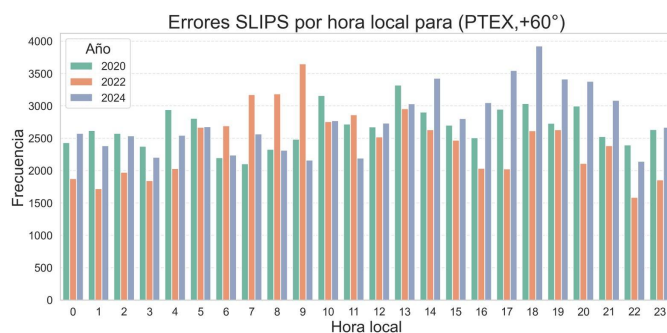


Figura J.2: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para PTEX.

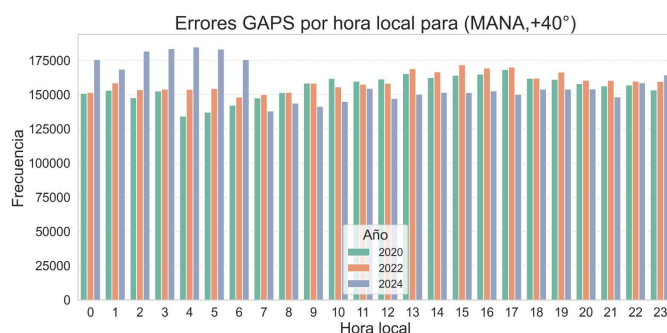


Figura J.3: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para MANA.

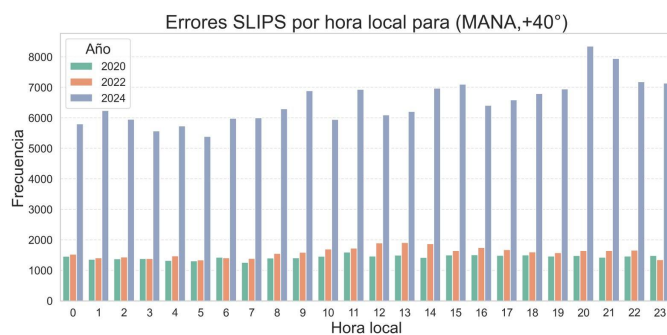


Figura J.4: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para MANA.

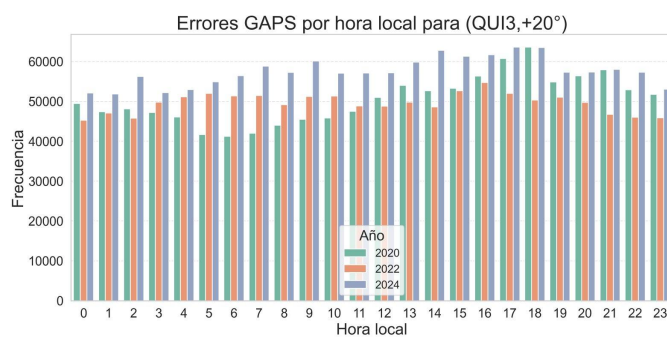


Figura J.5: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para QUI3.

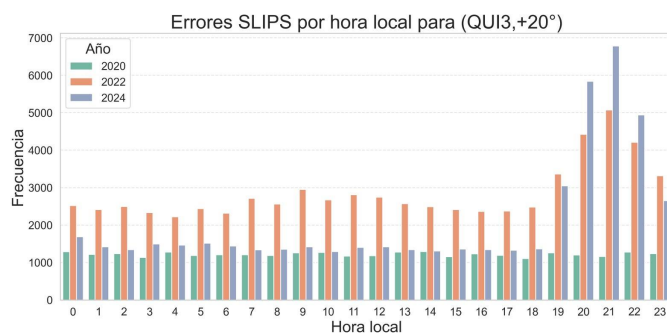


Figura J.6: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para QUI3.

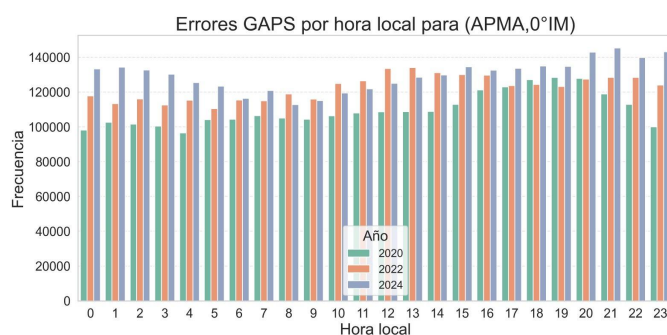


Figura J.7: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para APMA.

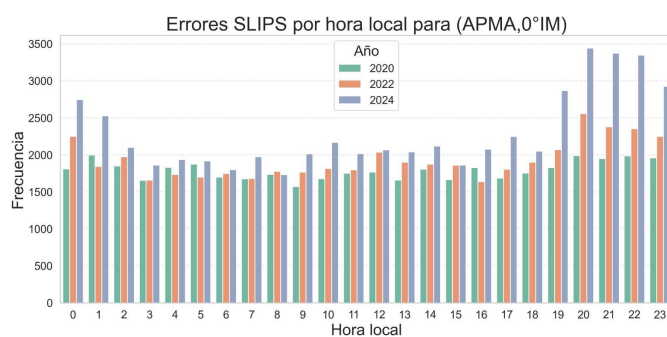


Figura J.8: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para APMA.

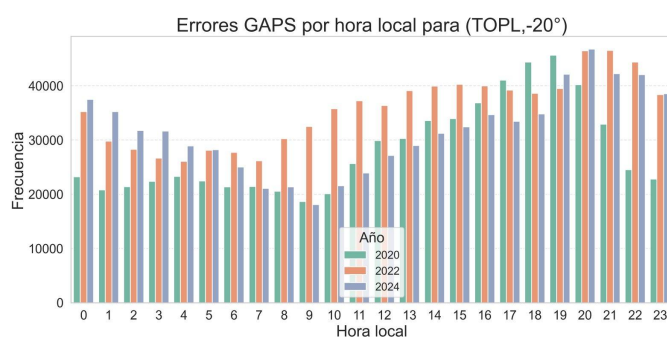


Figura J.9: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para TOPL.

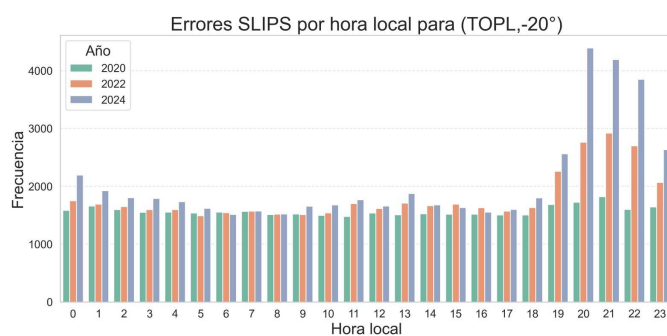


Figura J.10: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para TOPL.

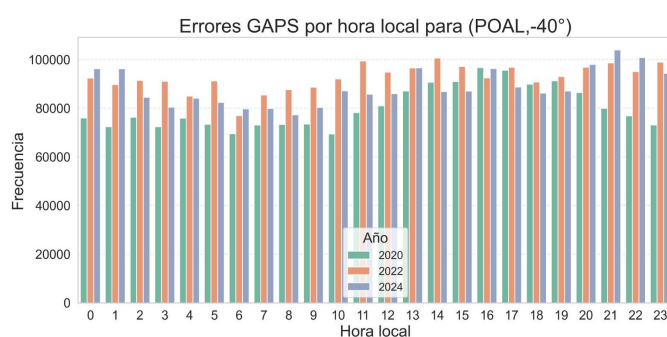


Figura J.11: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para POAL.

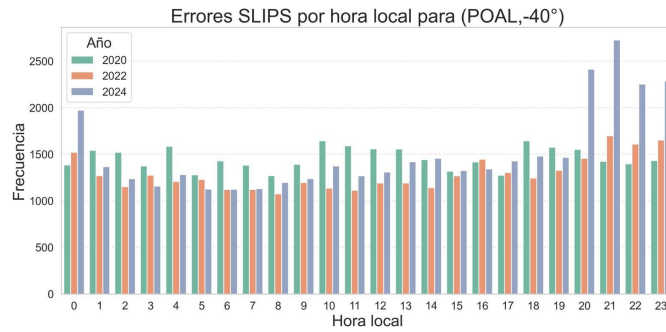


Figura J.12: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para POAL.

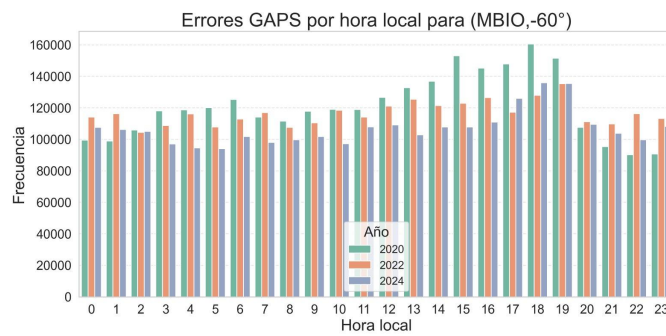


Figura J.13: Perfil de errores *GAPS* por horas por año para MBIO.

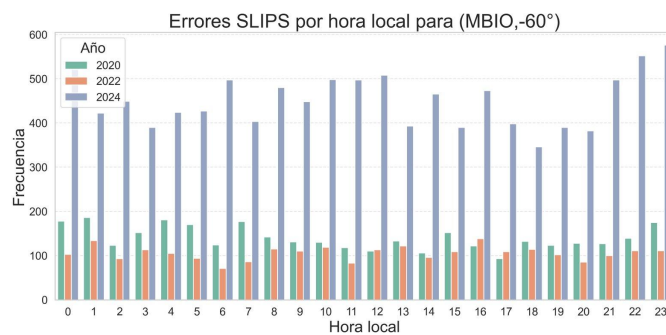


Figura J.14: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por horas por año para MBIO.

Apéndice K

Perfiles de errores por elevación/año para cada latitud

En esta sección mostramos 14 gráficos, 7 de ellos con errores *GAPS* y los otros 7 de *CYCLE-SLIPS* de cada una de las 7 estaciones del estudio que representan las distintas latitudes geomagnéticas. En este caso, tomaremos los valores de *GAPS* y *CYCLE-SLIPS* agrupados por elevación, y además por estación, y veremos su comportamiento por año. Para acceder a cada gráfico seguir la guía de la tabla Tabla K.1

Se pueden observar los gráficos de *GAPS* de PTEX, MANA, QUI3, APMA, TOPL, POAL y MBIO similares a un comportamiento proporcional inverso del tipo $y = kb^{-x}$.

Mientras que en el caso de los *CYCLE-SLIPS* presentan un perfil variado, pero no se parece al perfil de los *GAPS*. Podríamos decir que mientras el máximo de los *GAPS* se encuentra en la zona de los 0° a 5° , los *CYCLE-SLIPS* tienen sus valores máximos en los intervalos aproximados de 10° hasta los 35° .

Estación	Latitud	Perfil <i>GAPS</i>	Perfil <i>SLIPS</i>
PTEX	60°	Figura K.1	Figura K.2
MANA	40°	Figura K.3	Figura K.4
QUI3	20°	Figura K.5	Figura K.6
APMA	0°	Figura K.7	Figura K.8
TOPL	-20°	Figura K.9	Figura K.10
POAL	-40°	Figura K.11	Figura K.12
MBIO	-60°	Figura K.13	Figura K.14

Cuadro K.1: Tabla de gráficos con perfiles de errores *GAPS* y *CYCLE-SLIPS* por elevación por año por estación.

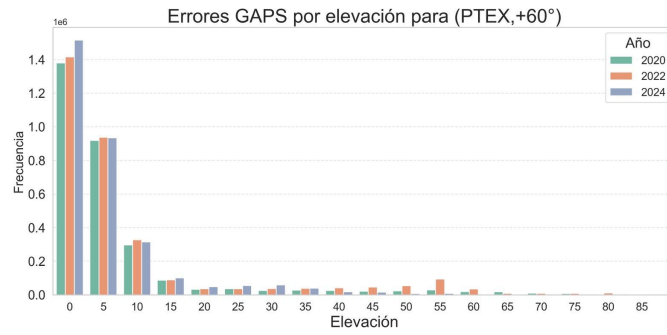


Figura K.1: Perfil de errores *GAPS* por año para PTEX.

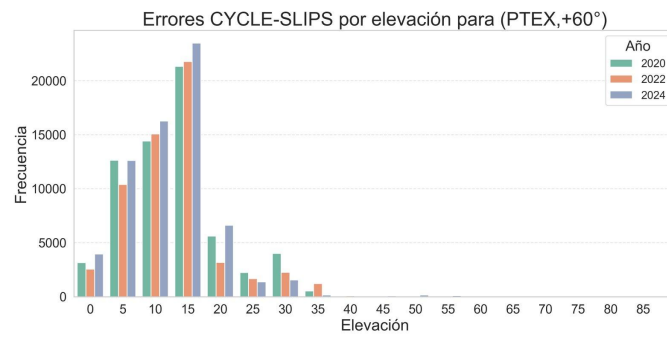


Figura K.2: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para PTEX.

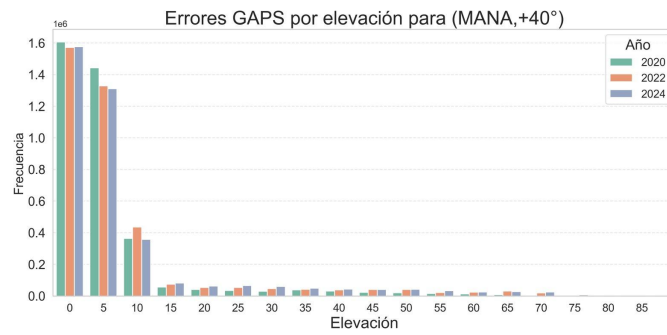


Figura K.3: Perfil de errores *GAPS* por año para MANA.

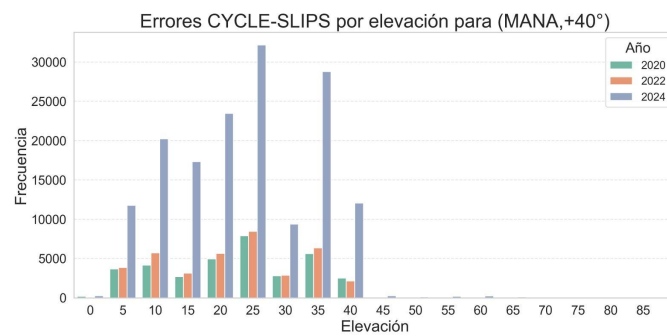


Figura K.4: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para MANA.

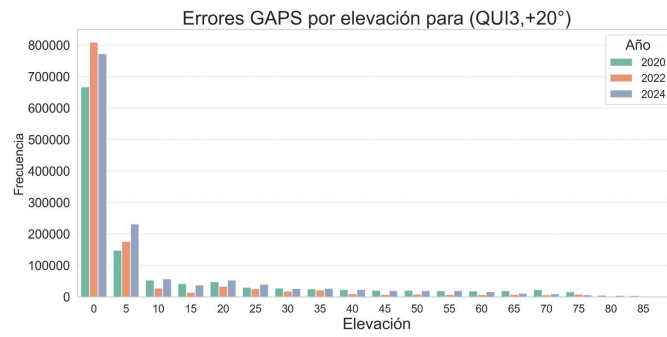


Figura K.5: Perfil de errores *GAPS* por año para QUI3.

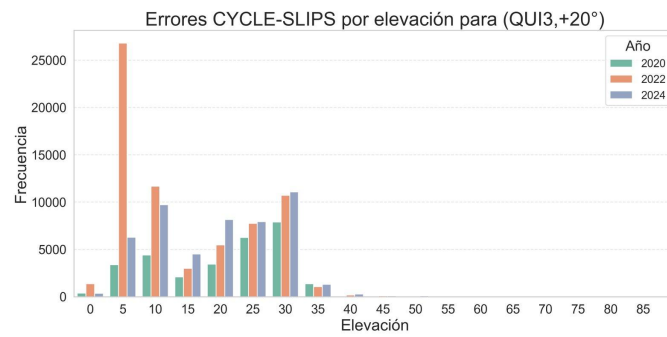


Figura K.6: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para QUI3.

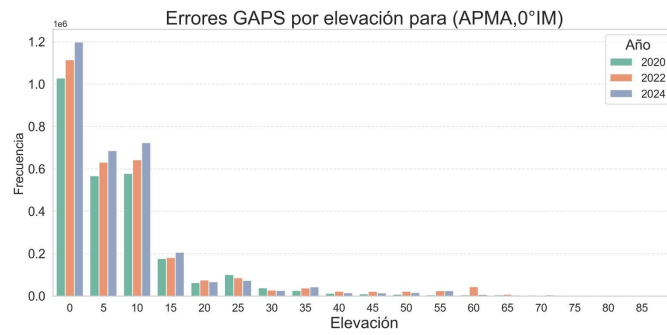


Figura K.7: Perfil de errores *GAPS* por año para APMA.

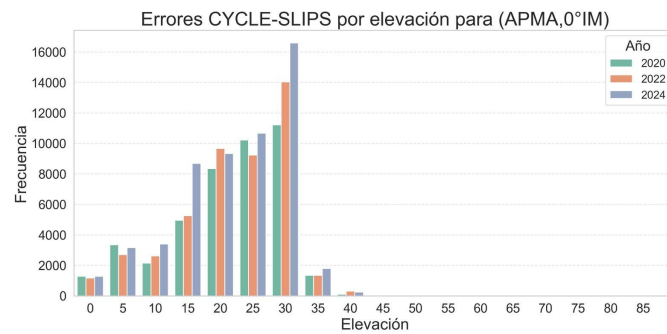


Figura K.8: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para APMA.

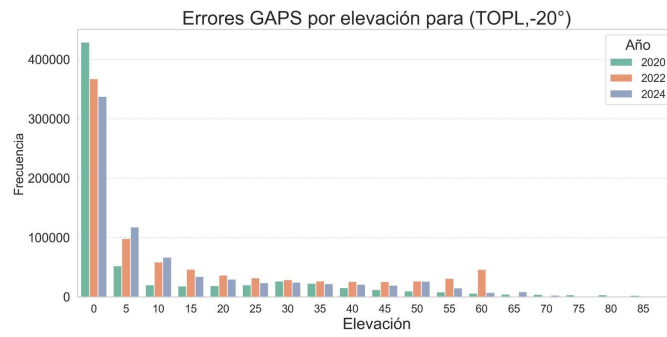


Figura K.9: Perfil de errores *GAPS* por año para TOPL.

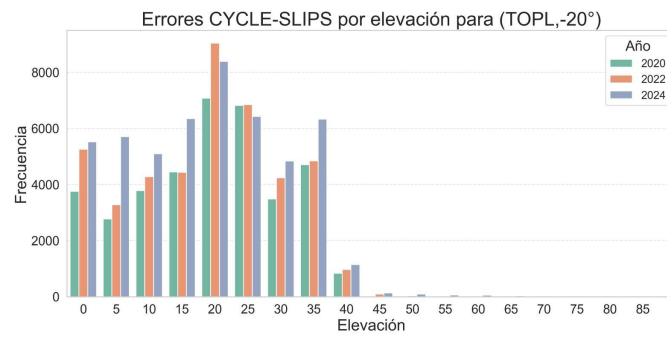


Figura K.10: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para TOPL.

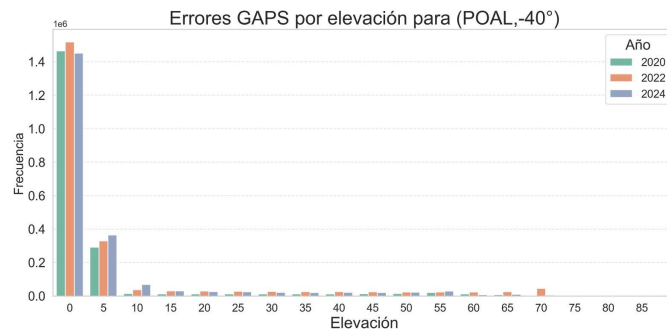


Figura K.11: Perfil de errores *GAPS* por año para POAL.

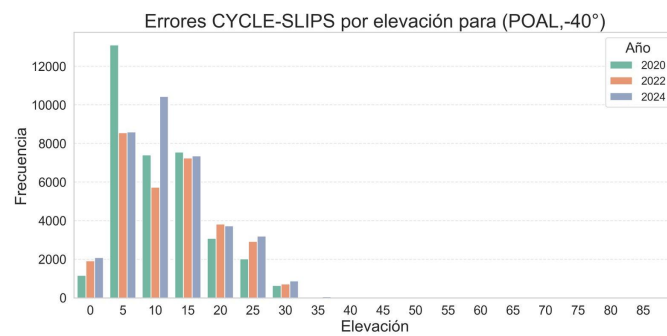


Figura K.12: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para POAL.

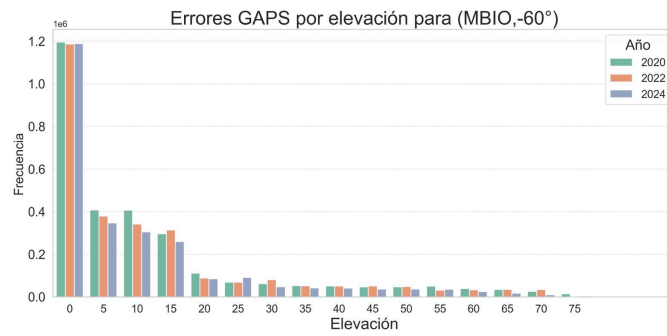


Figura K.13: Perfil de errores *GAPS* por año para MBIO.

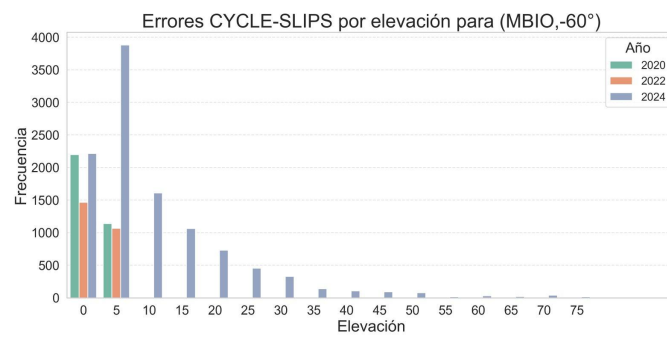


Figura K.14: Perfil de errores *CYCLE-SLIPS* por año para MBIO.

Apéndice L

Perfiles de errores por azimut para cada latitud

A continuación se presentan los gráficos que describen en detalle el comportamiento azimutal de los errores tanto *GAPS* como *CYCLE-SLIPS* para cada estación en formatos diferentes, así como los mapas de calor de la cobertura satelital de cada estación.

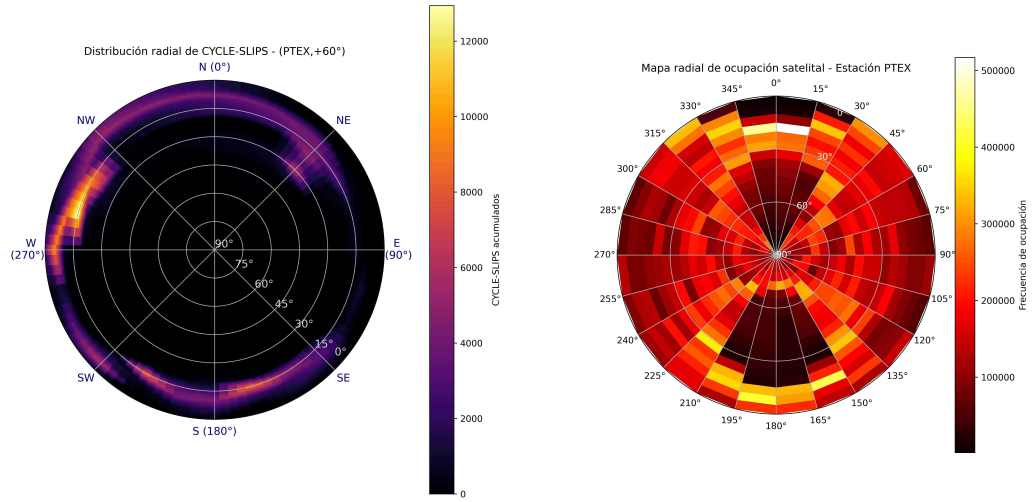
Mapas de Calor Radiales Totales vs. Cobertura Satelital

Observamos gráficas que contrastan para cada estación los errores acumulados en un mapa de calor de formato radial (elevación vs. azimut) con la suma de los errores de los 3 años (2020, 2022, 2024) por tipo frente al gráfico de calor de la presencia de los satélites cubriendo las distintas zonas de la bóveda celeste por el mismo período de tiempo.

Uno de los datos más notorios de este tipo de mapas es la diferencia de elevaciones entre los *GAPS* y los *CYCLE-SLIPS*, los *GAPS* se producen de forma más notoria cerca del horizonte y los *CYCLE-SLIPS* en elevaciones por arriba de los 10° aproximadamente.

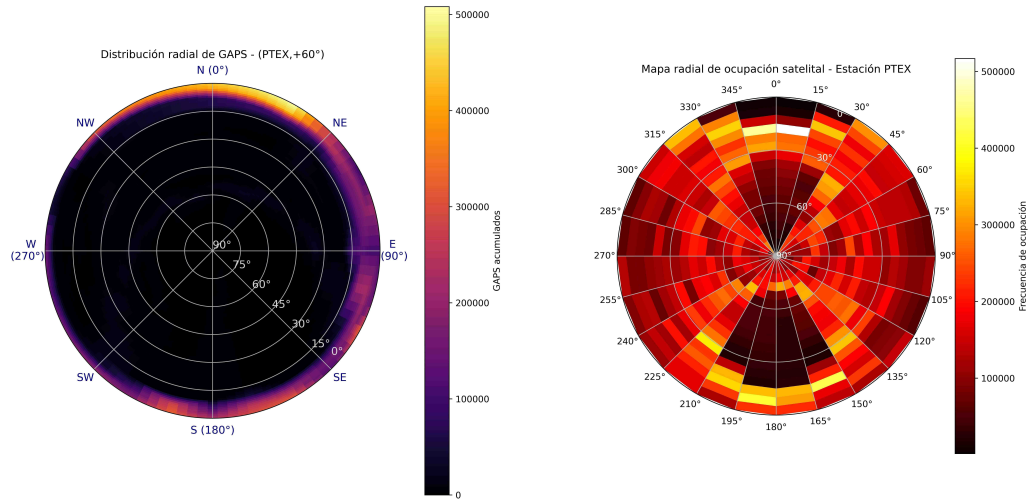
Otro aspecto es el gráfico de cobertura que deja ver un hueco (que indica los lugares donde los satélites no pasan de acuerdo a la órbita que tienen designada), que se va deslizando a medida que la estación está en una latitud diferente.

PTEX



(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para PTEX.

(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para PTEX.

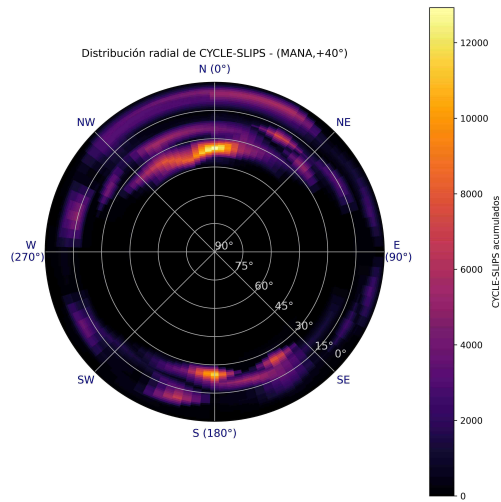


(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para PTEX.

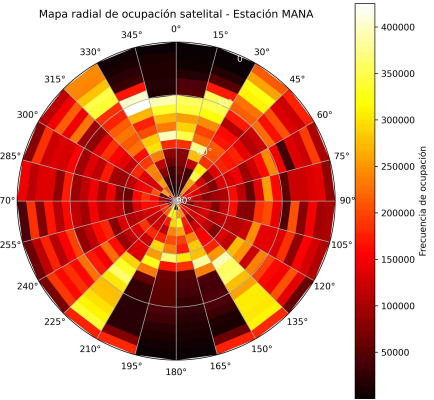
(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para PTEX.

Figura L.1: Comparación de la cuantificación de los errores totales en PTEX (60°).

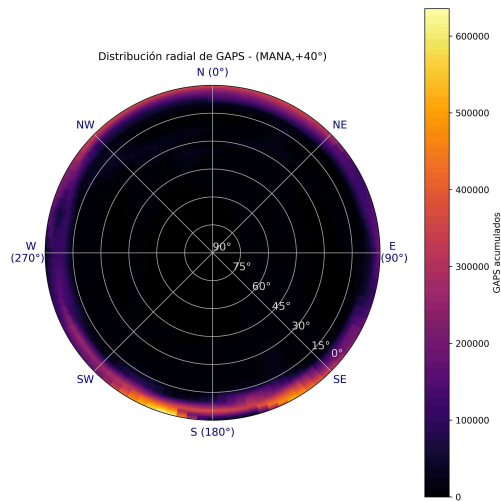
MANA



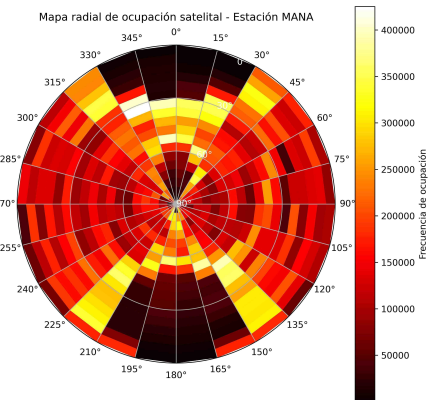
(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para MANA.



(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para MANA.



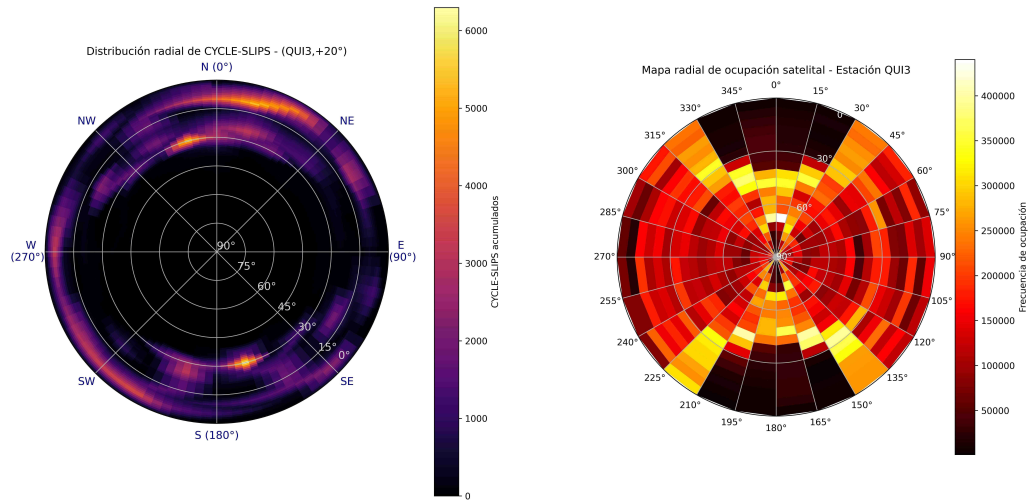
(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para MANA.



(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para MANA.

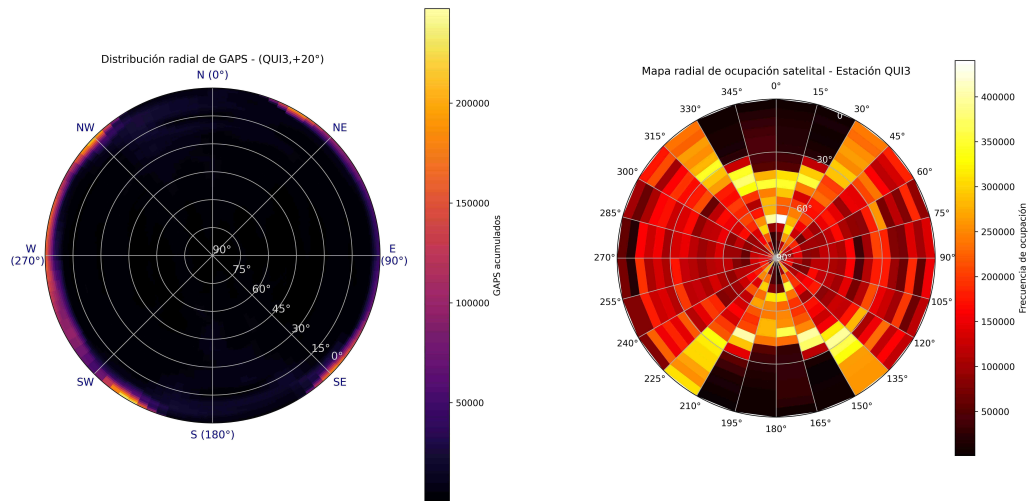
Figura L.2: Comparación de la cuantificación de los errores totales en MANA (40°).

QUI3



(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para QUI3.

(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para QUI3.

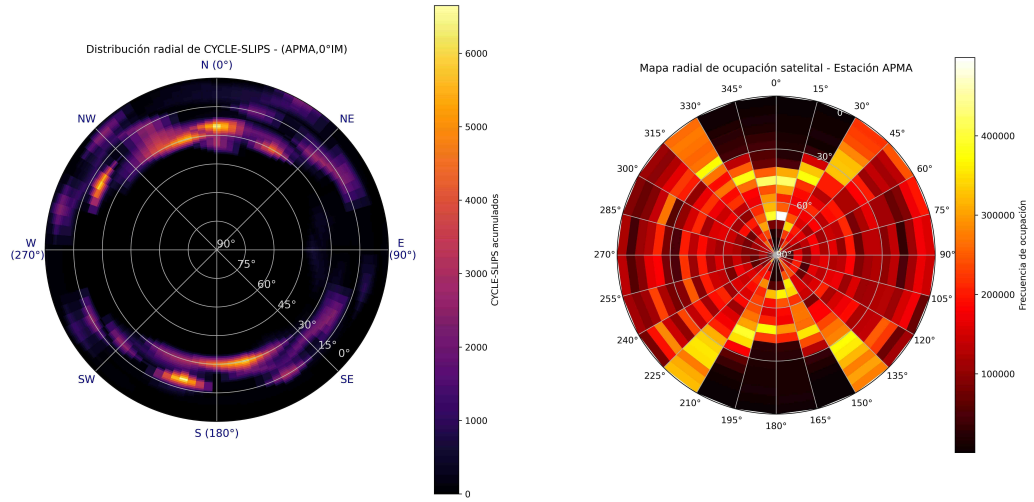


(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para QUI3.

(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para QUI3.

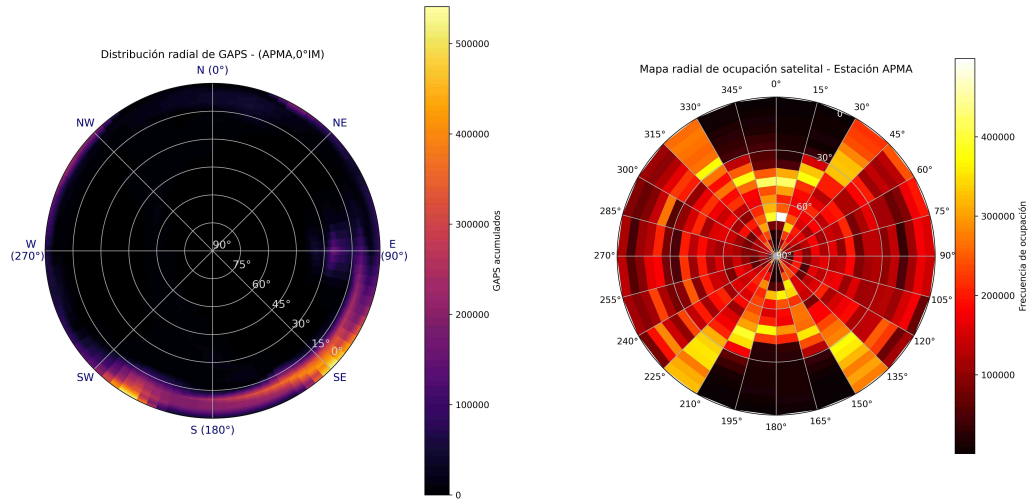
Figura L.3: Comparación de la cuantificación de los errores totales en QUI3 (20°).

APMA



(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para APMA.

(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para APMA.

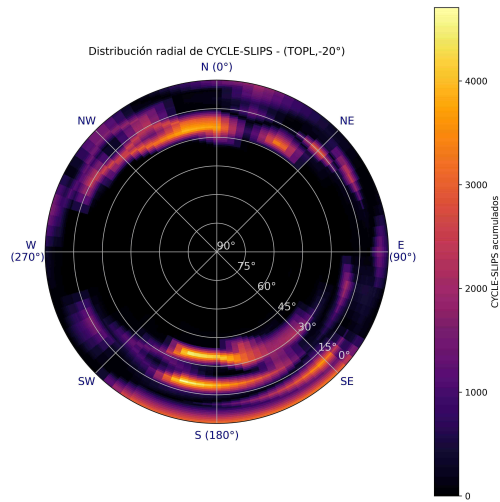


(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para APMA.

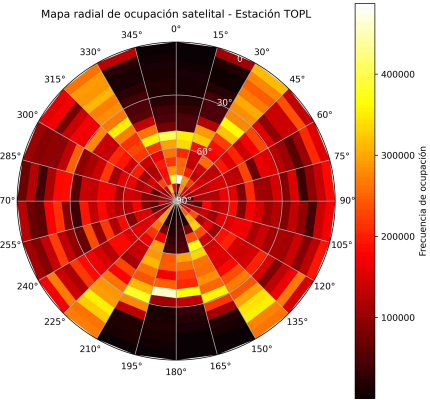
(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para APMA.

Figura L.4: Comparación de la cuantificación de los errores totales en APMA (0°).

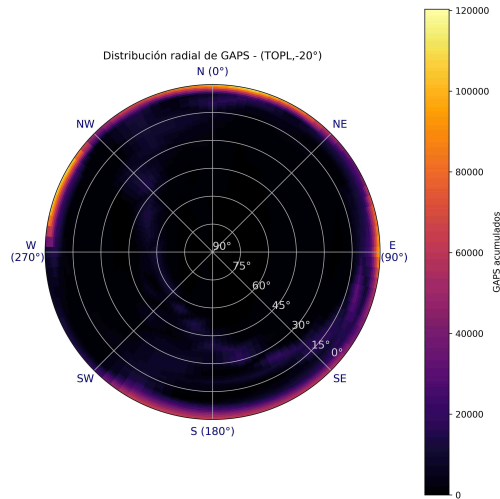
TOPL



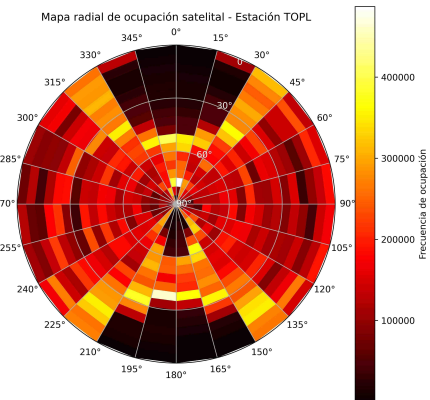
(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para TOPL.



(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para TOPL.



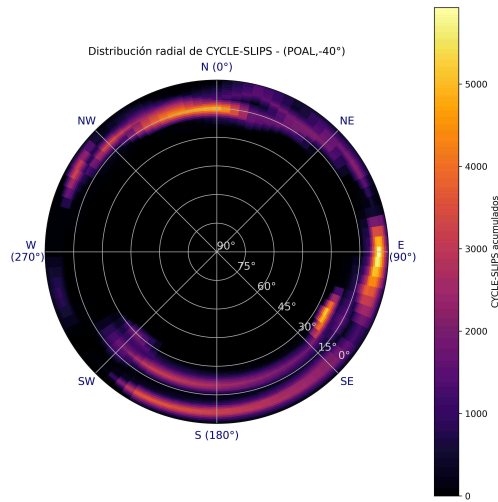
(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para TOPL.



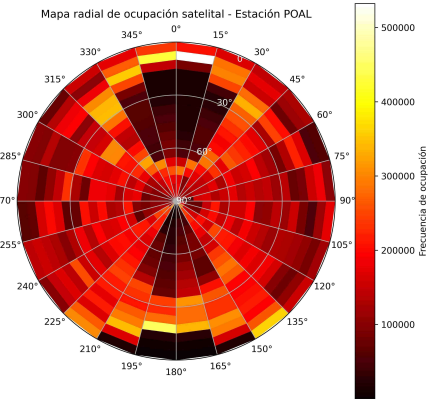
(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para TOPL.

Figura L.5: Comparación de la cuantificación de los errores totales en TOPL (-20°).

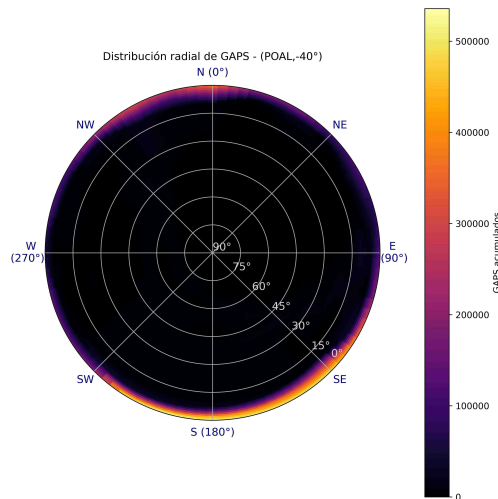
POAL



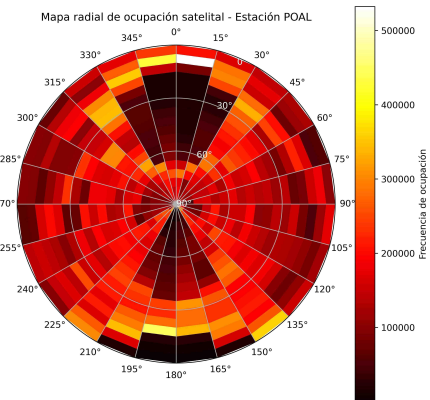
(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para POAL.



(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para POAL.



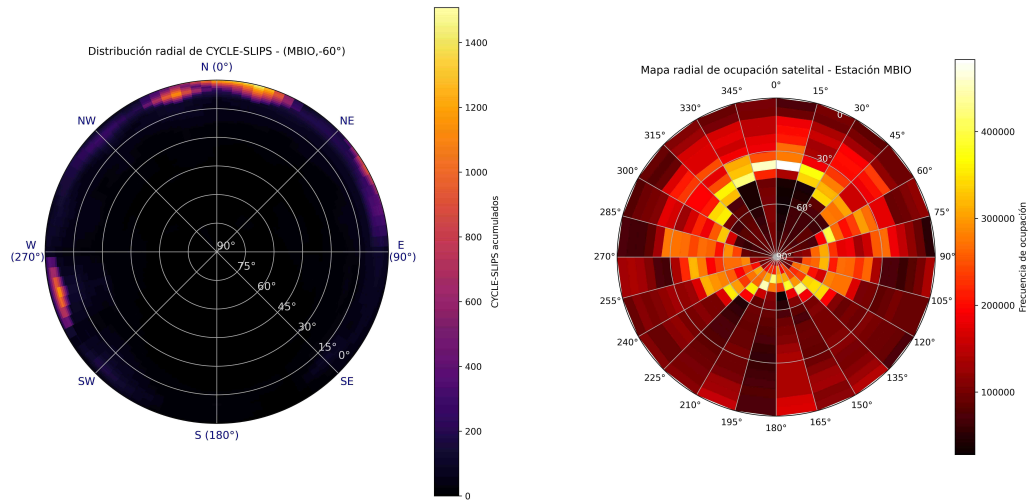
(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para POAL.



(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para POAL.

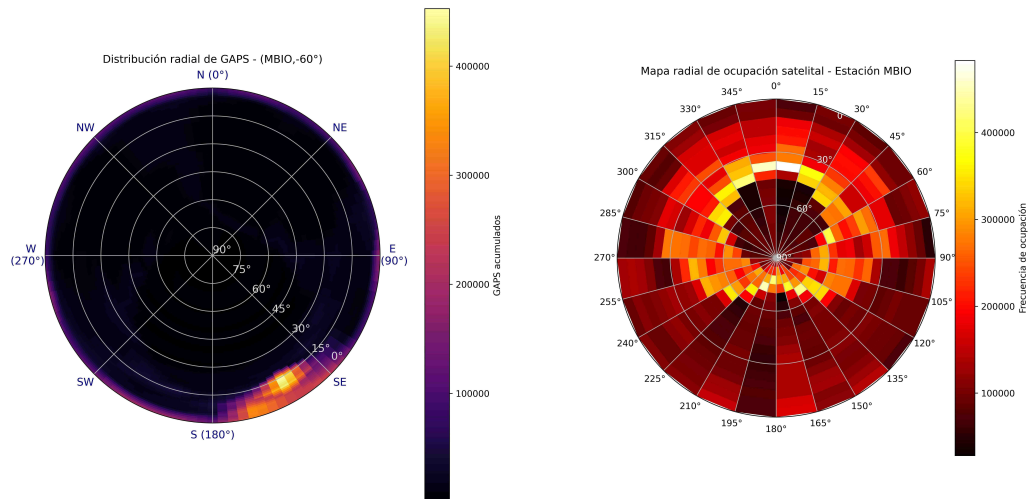
Figura L.6: Comparación de la cuantificación de los errores totales en POAL (-40°).

MBIO



(a) Mapa radial de calor con los errores *CYCLE-SLIPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para MBIO.

(b) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para MBIO.



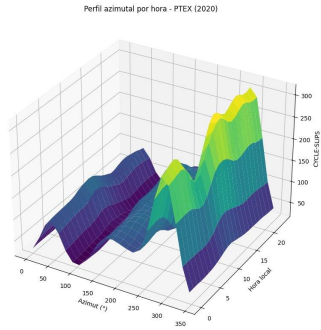
(c) Mapa radial de calor con los errores *GAPS* acumulados los 3 años (por elevación contra azimut), para MBIO.

(d) Cobertura satelital acumulada por los 3 años del estudio (por elevación contra azimut), para MBIO.

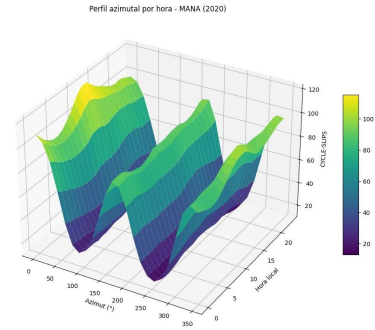
Figura L.7: Comparación de la cuantificación de los errores totales en MBIO (-60°).

Mapas 3D perfil azimutal por año por estación de errores por tipo

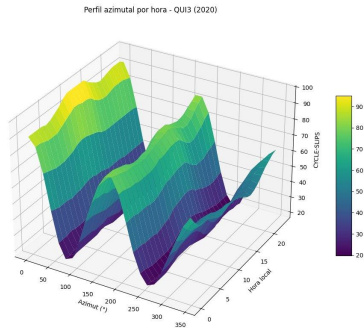
Aquí mostramos gráficas en 3D de los errores por tipo por estación por año.



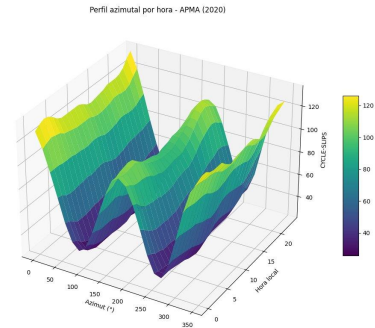
(a) *CYCLE-SLIPS* – PTEX – 2020



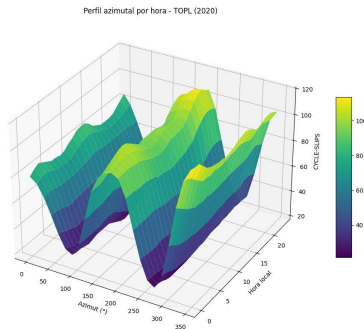
(b) *CYCLE-SLIPS* – MANA – 2020



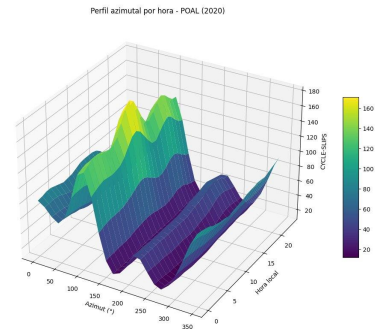
(c) *CYCLE-SLIPS* – QUI3 – 2020



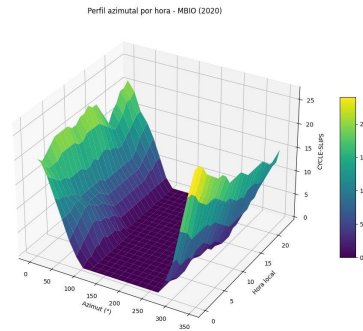
(d) *CYCLE-SLIPS* – APMA – 2020



(e) *CYCLE-SLIPS* – TOPL – 2020

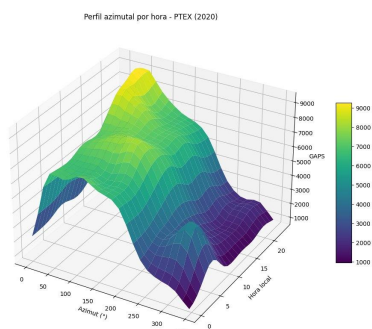


(f) *CYCLE-SLIPS* – POAL – 2020

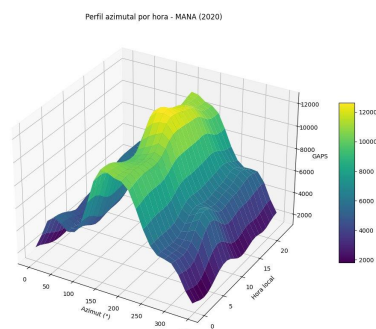


(g) *CYCLE-SLIPS* – MBIO – 2020

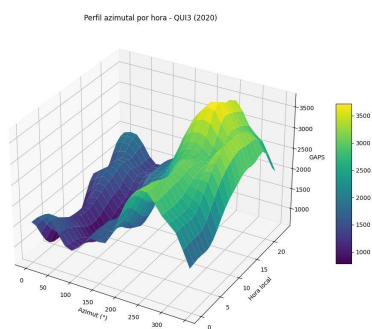
Figura L.8: Gráficos de frecuencia de errores en 2020, *CYCLE-SLIPS* contra azimut y hora local de la estación



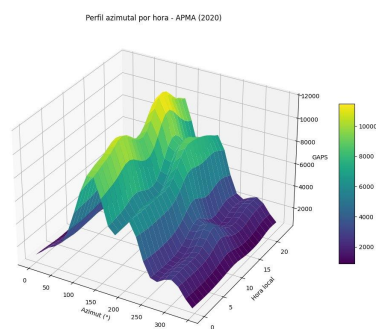
(a) *GAPS* – PTEX – 2020



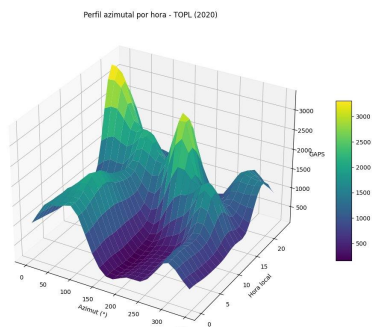
(b) *GAPS* – MANA – 2020



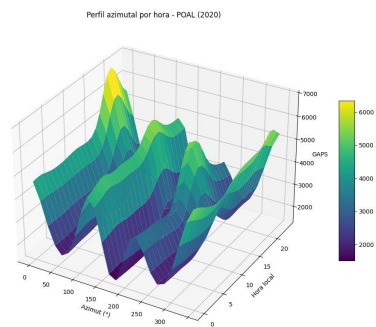
(c) *GAPS* – QUI3 – 2020



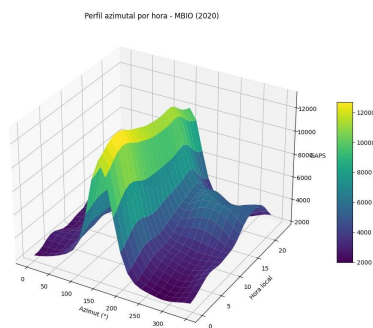
(d) *GAPS* – APMA – 2020



(e) *GAPS* – TOPL – 2020

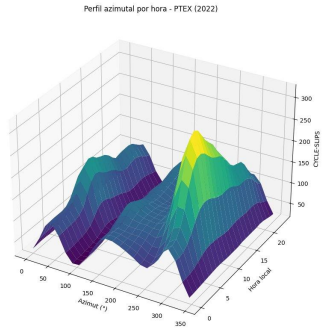


(f) *GAPS* – POAL – 2020

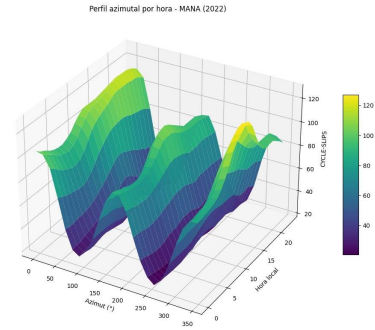


(g) *GAPS* – MBIO – 2020

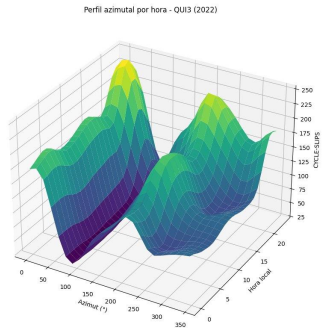
Figura L.9: Gráficos de frecuencia de errores en 2020, *GAPS* contra azimut y hora local de la estación



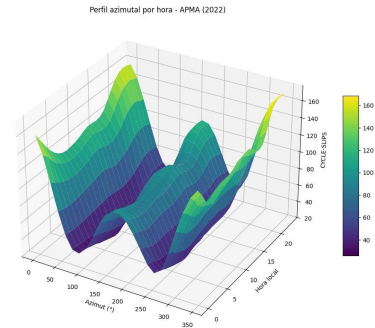
(a) *CYCLE-SLIPS* – PTEX – 2022



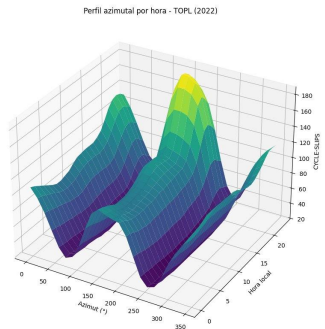
(b) *CYCLE-SLIPS* – MANA – 2022



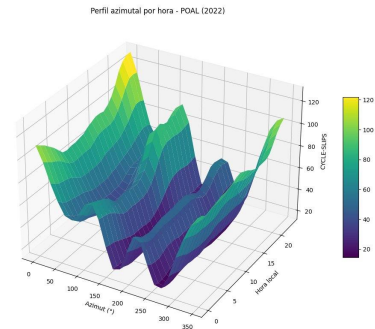
(c) *CYCLE-SLIPS* – QUI3 – 2022



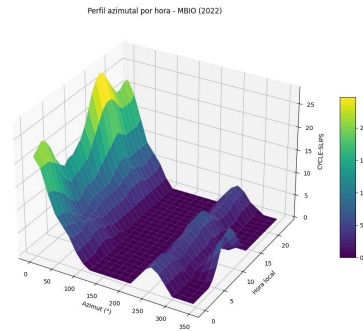
(d) *CYCLE-SLIPS* – APMA – 2022



(e) *CYCLE-SLIPS* – TOPL – 2022

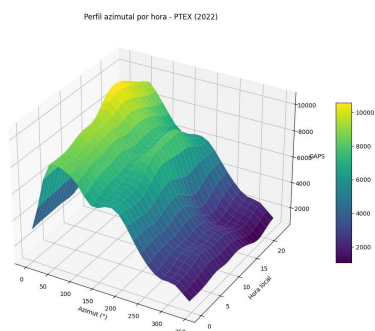


(f) *CYCLE-SLIPS* – POAL – 2022

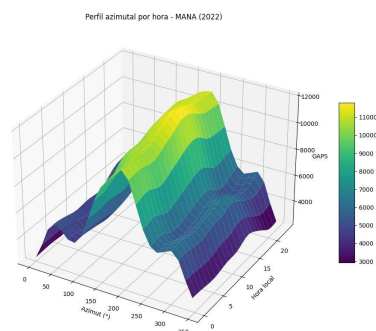


(g) *CYCLE-SLIPS* – MBIO – 2022

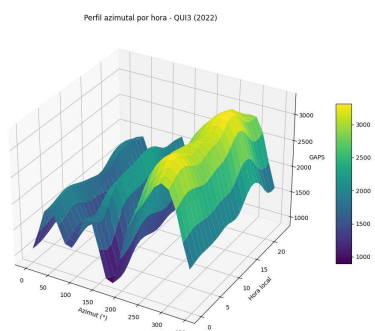
Figura L.10: Gráficos de frecuencia de errores en 2022, *CYCLE-SLIPS* contra azimut y hora local de la estación



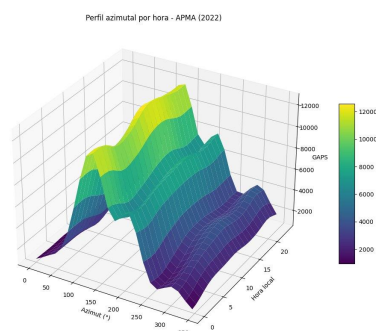
(a) *GAPS* – PTEX – 2022



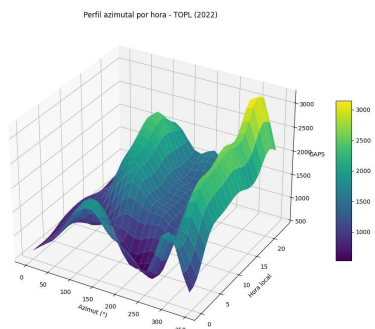
(b) *GAPS* – MANA – 2022



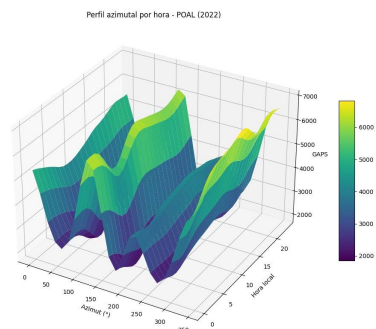
(c) *GAPS* – QUI3 – 2022



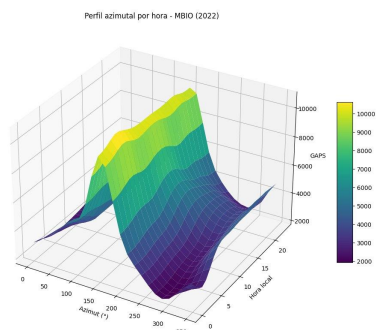
(d) *GAPS* – APMA – 2022



(e) *GAPS* – TOPL – 2022

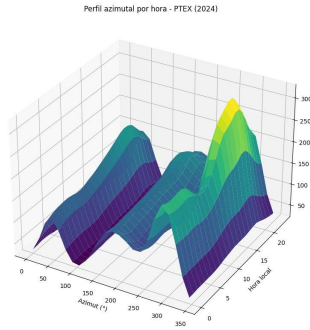


(f) *GAPS* – POAL – 2022

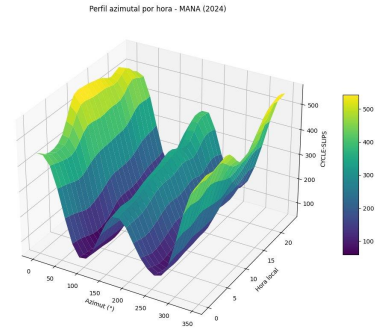


(g) *GAPS* – MBIO – 2022

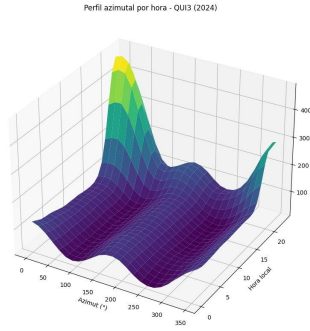
Figura L.11: Gráficos de frecuencia de errores en 2022, *GAPS* contra azimut y hora local de la estación



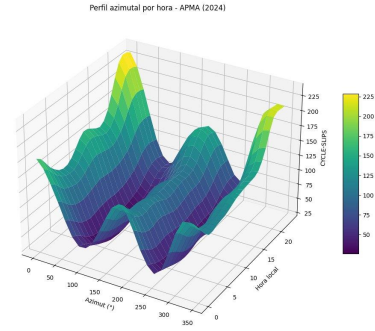
(a) *CYCLE-SLIPS* – PTEX – 2024



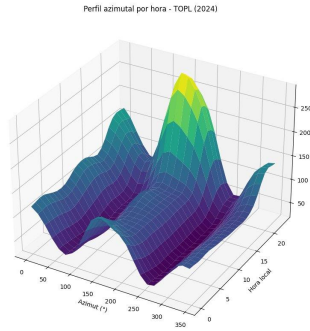
(b) *CYCLE-SLIPS* – MANA – 2024



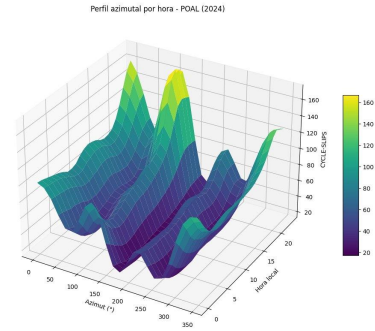
(c) *CYCLE-SLIPS* – QUI3 – 2024



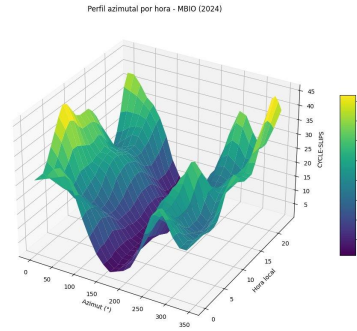
(d) *CYCLE-SLIPS* – APMA – 2024



(e) *CYCLE-SLIPS* – TOPL – 2024

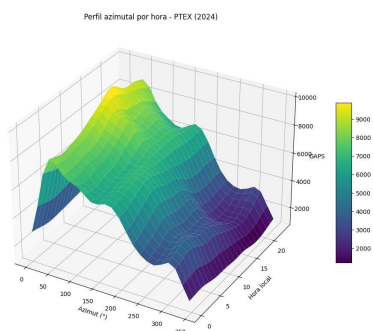


(f) *CYCLE-SLIPS* – POAL – 2024

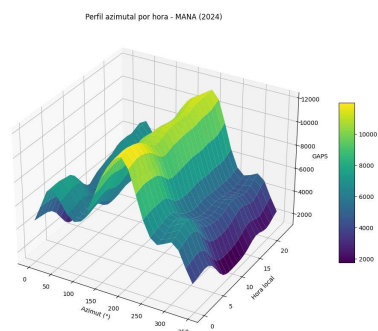


(g) *CYCLE-SLIPS* – MBIO – 2024

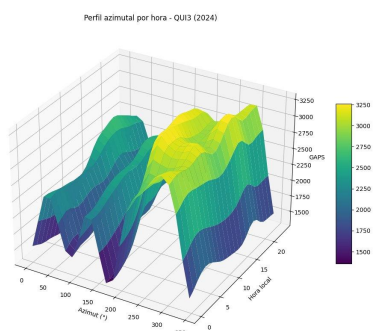
Figura L.12: Gráficos de frecuencia de errores en 2024, *CYCLE-SLIPS* contra azimuth y hora local de la estación



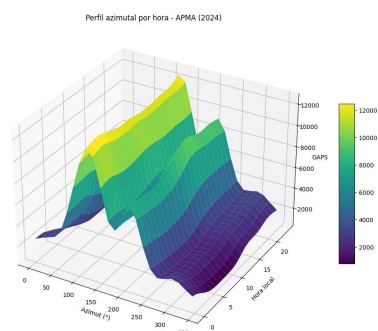
(a) *GAPS* – PTEX – 2024



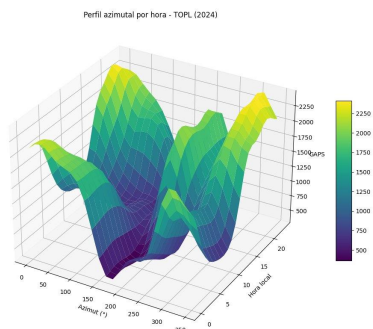
(b) *GAPS* – MANA – 2024



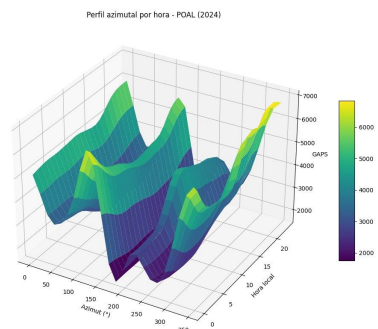
(c) *GAPS* – QUI3 – 2024



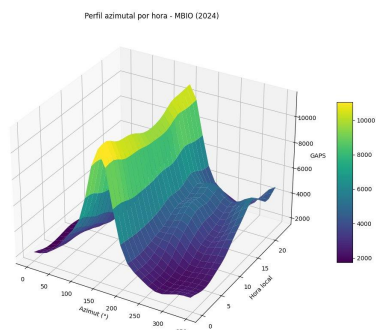
(d) *GAPS* – APMA – 2024



(e) *GAPS* – TOPL – 2024



(f) *GAPS* – POAL – 2024



(g) *GAPS* – MBIO – 2024

Figura L.13: Gráficos de frecuencia de errores en 2024, *GAPS* contra azimut y hora local de la estación

Bibliografía

- BOSY, J. (2014), «Global, regional and national geodetic reference frames for geodesy and geodynamics», *Pure and applied geophysics*, **171**(6), págs. 783–808.
- BYCHKOV, V. L., G. V. GOLUBKOV y A. I. NIKITIN (2014), «The Atmosphere and Ionosphere», *Elementary Processes, Monitoring, and Ball Lightning*, págs. 201–367.
- CARBONETTI, M. A. y M. A. GENDE (2018), «Implentación y evaluación de métodos no paramétricos para detectar variaciones bruscas en series de tiempo GNSS», *Geoacta*, **43**.
- CHEN, F. F. *et al.* (1984), *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, tomo 1, Springer.
- DA SILVA PICAÑO, G. A. (2019), *Desenvolvimento e análise de um índice ionosférico baseado em dados de Conteúdo Eletrônico Total*, Tesis de Maestría, INPE.
- DACH, R., S. LUTZ, P. WALSER y P. FRIDEZ (2015), *Bernese GNSS Software Version 5.2*.
- DAVIES, K. (1990), *Ionospheric Radio (Vol. 1-2)*, Peter Peregrinus Ltd.
- DUHAU, S. y M. C. AZPIAZU (1981), «La corriente integrada en la capa E ecuatorial: modelo teórico y su aplicación», *Geoacta*, **11**.
- FITZPATRICK, R. (2022), *Plasma physics: an introduction*, Crc Press.
- FUJITA, S., S. SAITO y T. YOSHIHARA (2013), «Cycle Slip Detection and Correction Methods with Time-Differenced Model for Single Frequency GNSS Applications», *Revista del Instituto de Ingenieros de Sistemas, Control e Información. Vol. 26, No. 1, pp. 8–15*.
- GAGE, EARTHSCOPE, UNAVCO y NSF (2025), «EarthScope Data Server», Descarga de archivos GNSS, URL <https://gage-data.earthscope.org/archive/gnss/>.
- GALDYN, F., R. ZAJDEL y K. SOSNICA (2023), «RINEXAV: GNSS global network selection open-source software based on qualitative analysis of RINEX files», *SoftwareX*.
- GALERA MONICO, J. F. (2008), *Posicionamento pelo GNSS: descricao, fundamentos e aplicacoes. 2 ed.*, Unesp.

- GATICA-ACEVEDO, V. J., M. SÁNCHEZ-MERAZ y C. SOSA-PAZ (2015), «Estudio del contenido total de electrones (TEC) sobre el territorio mexicano», *Científica*, **19**(2), págs. 81–90.
- GENG, W., W. HUANG, G. LIU, S. LIU, B. LUO y Y. CHEN (2021), «The Distribution Characteristics of GPS Cycle Slip Over the China Mainland and Adjacent Region During the Declining Solar Activity (2015–2018) Period of Solar Cycle 24», *Radio Science*, **56**(5), pág. e2020RS007196, e2020RS007196 2020RS007196, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020RS007196>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020RS007196>.
- GPS.GOV (2024), «Global Positioning System (GPS)», Último acceso: 1 de octubre de 2024, URL <https://gps.gov/>.
- GURTNER, W. (2009), «RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.01», *Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Bolulder, Colorado*.
- GURTNER, W. y L. ESTEY (2007), «Rinex-the receiver independent exchange format-version 3.00», *Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Bolulder, Colorado*.
- HARGREAVES, J. K. (1992), *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere*, Cambridge university press.
- HEGARTY, C. J., P. J. TEUNISSEN y O. MONTENBRUCK (2017), *The Global Positioning System (GPS)*, capítulo 7, Springer International Publishing, Cham, págs. 197–218, URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_7.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M., J. M. JUAN, J. SANZ, À. ARAGÓN-ÀNGEL, A. GARCÍA-RIGO, D. SALAZAR y M. ESCUDERO (2011), «The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques», *Journal of Geodesy*, **85**, págs. 887–907.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER y J. COLLINS (2012), *Global positioning system: theory and practice*, Springer Science & Business Media.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER y E. WASLE (2007), *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER y E. WASLE (2008), *GNSS-Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media.
- HUNSUCKER, R. D. y R. D. HUNSUCKER (1991), «Radio Propagation in a Plasma», *Radio Techniques for Probing the Terrestrial Ionosphere*, págs. 40–64.

- IBGE (2025), «Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)», Descarga de archivos RINEX, URL https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/dados/.
- IGS (2024), «International GNSS Service (IGS)», Último acceso: 12 de septiembre de 2024, URL <https://igs.org/>.
- JANSSEN, V. (2024), «Understanding the RINEX format», en *Proceedings of Association of Public Authority Surveyors Conference (APAS2024)*, págs. 3–18.
- JOHNSON, R. G. (1979), «Energetic ion composition in the Earth's magnetosphere», *Reviews of Geophysics*, **17**(4), págs. 696–705.
- KAPLAN, E. D. y C. HEGARTY (2017), *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*, Artech house.
- KELLEY, M. C. (2009), *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics (2nd ed.)*, Cornell University Academic Press.
- KIM, M., J. SEO y J. LEE (2014), «A Comprehensive Method for GNSS Data Quality Determination to Improve Ionospheric Data Analysis», *Sensors*, **14**(8), págs. 14 971–14 993, URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/14971>.
- KLOBUCHAR, J. A. (1987), «Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users», *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, **AES-23**(3), págs. 325–331.
- KLOBUCHAR, J. A. (1996), «Ionospheric effects on GPS», *Chapter 12 of global positioning system: Theory and applications*, **1**, pág. 30.
- KOMJATHY, A. (2023), «Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System», *Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188*.
- LANGLEY, R. B. (2007), «GPS receivers and the observables», *GPS for Geodesy*, págs. 141–173.
- LIDE, D. R. (2004), *CRC handbook of chemistry and physics*, tomo 85, CRC press.
- LUHMANN, J. (1995), «Ionospheres», *Introduction to space physics*, págs. 183–202.
- LUO, X., Z. LIU, Y. LOU, S. GU y B. CHEN (2017), «A study of multi-GNSS ionospheric scintillation and cycle-slip over Hong Kong region for moderate solar flux conditions», *Advances in Space Research*, **60**(5), págs. 1039–1053, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117717303836>.
- MAGDALENO TORRAS, S. (2014), *Anomalías espacio-temporales de la ionosfera y su repercusión en las comunicaciones satelitales*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

- MANNUCCI, A., B. WILSON, D. YUAN, C. HO, U. LINDQWISTER y T. RUNGE (1998), «A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements», *Radio science*, **33**(3), págs. 565–582.
- MELBOURNE, W. G. (1985), «The case for ranging in GPS-based geodetic systems», en *Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System*, US Department of Commerce Rockville, Maryland, págs. 373–386.
- MISHRA, S., S. DAS, S. S. PATNAIK, S. KUMAR y B. K. KANAUJIA (2020), «Low-profile circularly polarized planar antenna for GPS L1, L2, and L5 bands», *Microwave and Optical Technology Letters*, **62**(2), págs. 806–815.
- MISRA, P. (2006), «Global positioning system: Signals», *Measurements, and Performance Ganga-Jamuna Press*.
- MONICO, J. F. G. (2002), «Posicionamento pelo Navstar-GPS», *UNESP*.
- MONTENBRUCK, O., E. GILL y F. LUTZE (2002), «Satellite orbits: models, methods, and applications», *Appl. Mech. Rev.*, **55**(2), págs. B27–B28.
- MOYA ZAMORA, J. (2022), «Procesamiento GNSS en el marco geodésico CR-SIRGAS: Influencia de las épocas de observación y referencia», *Ingeniería*, **32**(2), págs. 52–86.
- NASA (2024), «National Aeronautics and Space Administration (NASA)», Último acceso: 12 de septiembre de 2024, URL <https://cddis.nasa.gov/>.
- PIÑÓN, D. A., D. D. GÓMEZ, R. SMALLEY, S. R. CIMBARO, E. A. LAURÍA y M. G. BEVIS (2018), «The History, State, and Future of the Argentine Continuous Satellite Monitoring Network and Its Contributions to Geodesy in Latin America.», URL <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinx>.
- RISHBETH, H. (2003), «Basic physics of the ionosphere», *Propagation of Radiowaves*, edited by L. Barclay, págs. 285–311.
- RISHBETH, H. y L. GARRIOTT (1969), «Introduction to ionospheric physics», *Academic Press*.
- SARDÓN, E., A. RIUS y N. ZARRAOA (1993), «GPS ionospheric delays», *IAG*.
- SCHAEER, S., G. BEUTLER, M. ROTHACHER y T. A. SPRINGER (1996), «Daily global ionosphere maps based on GPS carrier phase data routinely produced by the CODE Analysis Center», en *Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop 1996*, IGS, págs. 3–5.
- SCHUNK, R. W. y A. F. NAGY (2009), *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge University Press.

- SCOTT, C. y M. WILD (2025), «Appleton's Ionosphere», *Astronomy & Geophysics*, **66**(2), págs. 2.25–2.30, <https://academic.oup.com/astrogeo/article-pdf/66/2/2.25/62800738/ataf008.pdf>, URL <https://doi.org/10.1093/astrogeo/ataf008>.
- SEEBER, G. (2003), *Satellite geodesy*, Walter de gruyter.
- SPILKER JR, J. J., P. AXELRAD, B. W. PARKINSON y P. ENGE (1996), *Global positioning system: theory and applications, volume I*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- STUBBE, P. y T. HAGFORS (1997), «The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory», *Surveys in Geophysics*, **18**(1), págs. 57–127.
- TREUMANN, R. A. y W. BAUMJOHANN (1997), *Advanced space plasma physics*, tomo 30, Imperial College Press London.
- VALERO, J. L. B., N. G. VILLÉN y R. C. ROMÁ (2019), *GNSS: GPS, Galileo, Glonass, Beidou*, Universitat Politècnica de València.
- WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, K. (2025), «Geomagnetic Indices – Section 3», <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>, Último acceso: octubre de 2025.
- WÜBBENA, G. (1985), «Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements», en *Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the global positioning system*, tomo 19, US Department of Commerce Rockville, Maryland, págs. 403–412.
- ZHANG, Z., J. ZENG, B. LI y X. HE (2023), «Principles, methods and applications of cycle slip detection and repair under complex observation conditions», *Journal of Geodesy*, **97**(5), pág. 50.
- ZUMBERGE, J. y G. GENDT (2001), «The demise of selective availability and implications for the international GPS service», *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, **26**(6-8), págs. 637–644.

Resumen autobiográfico

Rogelio Aguirre Gutiérrez, candidato para obtener el grado de
Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Tesis:

**ESTUDIO DE ERRORES GNSS Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR Y LA
IONÓSFERA**

Nacido en Monterrey N. L. México, el 14 de diciembre de 1957, desde pequeño mostró inclinación hacia las ciencias y el estudio del Universo. No tuvo preescolar e inició en la escuela primaria Club de Leones No. 10 los primeros 2 años, para concluir en la escuela primaria Club de Leones No. 5. Continuó en la Secundaria Profesor Moisés Sáenz, para después entrar a la Preparatoria No. 7 de la UANL. En 1974 ingresó a la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la misma Universidad para concluir su Licenciatura en Física en 1978. Durante su estancia en la FCFM y después de concluir su carrera, tuvo un diplomado de Astronomía en la Universidad de la Laguna en Tenerife, España. A su regreso fundó de varios grupos de astronomía entre los que se cuentan: el Área de Astronomía de la FCFM, el CAUG (Club Astronómico Universitario Galileo) en la Preparatoria No. 3 donde fue maestro, la Sociedad Astronómica del Planetario Alfa, y heredó el puesto de profesor de astronomía de la preparatoria, Eugenio Garza Sada del Tecnológico de Monterrey por parte del Ing. Elías Bertrand. Aprendió a desarrollar sistemas y la didáctica de las ciencias y música, y durante toda su vida deambuló entre estas tres disciplinas. Siempre apoyó a la FCFM en sus esfuerzos por crecer y tuvo la oportunidad de iniciar las actividades en el primer observatorio astronómico de la facultad en Zuazua N. L., lugar donde se organizaron muchas actividades divulgativas y observacionales principalmente en el tema de la observación de ocultaciones de estrellas por asteroides con el Dr. Pedro Valdés Sada. Actualmente, espera seguir colaborando con el Dr. Eduardo Pérez Tijerina en la divulgación astronómica que FCFM ofrece a la sociedad y/o continuar sus estudios, investigaciones e intereses.