



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

CORRECCIONES DE RETARDOS IONOSFÉRICOS EN RADIO SEÑALES DE OBJETOS CELESTES.

ESTIMACION DEL TEC Y OBTENCION DE LA ROTACION DE FARADAY DE SEÑALES GPS EN LA IONOSFERA SOBRE ECUADOR

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO**

KEVIN RICARDO PROAÑO BENÍTEZ

kevin.proano01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ERICSON DANIEL LÓPEZ IZURIETA, PH.D.

ericsson.lopez@epn.edu.ec

DMQ, FEBRERO 2024

CERTIFICACIONES

Yo, KEVIN RICARDO PROAÑO BENÍTEZ, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Kevin Ricardo Proaño Benítez

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Kevin Ricardo Proaño Benítez, bajo mi supervisión.

Ericson Daniel López Izurieta, Ph.D.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el(los) producto(s) resultante(s) del mismo, es(son) público(s) y estará(n) a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Kevin Ricardo Proaño Benítez

Ericson Daniel López Izurieta, Ph.D.

RESUMEN

El estudio realizado consistió en la recolección de datos de señales GPS para cuatro estaciones ubicadas en el Ecuador: EPEC, LJEC, SIEC y SNLR. Estos datos fueron obtenidos en formato RINEX y se utilizaron para estimar el Contenido Total de Electrones (TEC) durante varios periodos de tiempo. Con los datos de TEC de estas estaciones y valores del campo magnético, se estimó el ángulo de rotación de Faraday que experimentarían las señales de radio del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Se obtuvo una variación en los valores obtenidos entre las estaciones, especialmente al comparar SNLR, ubicada al norte del Ecuador, con SIEC, ubicada al sur del Ecuador. Se empleó la estación de SIEC en lugar de la estación LJEC debido a inconsistencias de datos. Además, se pudo observar la existencia de una dependencia entre los valores del TEC y fenómenos naturales como la actividad solar. Este estudio resalta la importancia del TEC y la rotación de Faraday como indicadores clave para comprender la dinámica de la ionosfera y su relación con la actividad solar.

Palabras clave: TEC, ionósfera, pseudorange, rotación de Faraday, ciclo solar.

ABSTRACT

The study conducted involved collecting GPS signal data from four stations located in Ecuador: EPEC, LJEC, SIEC, and SNLR. These data were obtained in RINEX format and used to estimate the Total Electron Content (TEC) during various time periods. Using the TEC data from these stations and magnetic field values, the Faraday rotation angle experienced by radio signals used by GPS was estimated. There was variation in the values obtained between the stations, especially when comparing SNLR (located in northern Ecuador) with SIEC (located in southern Ecuador). The SIEC station was chosen due to inconsistencies with LJEC data. Additionally, a relationship between TEC values and natural phenomena such as solar activity was observed. This study highlights the importance of TEC and Faraday rotation as key indicators for understanding ionospheric dynamics and their connection to solar activity

Keywords: TEC, pseudorange, Faraday rotation, ionosphere, Solar cycle.

Índice general

1. Descripción del componente desarrollado	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	2
1.4. Marco teórico	3
1.4.1. Estructura de la Ionosfera	3
1.4.2. Plano vertical de la ionosfera	4
1.4.3. Fenómenos Ionosféricos	5
1.4.4. Campo magnético de la tierra	6
1.4.5. Impacto de las Señales de Radiofrecuencia en la Ionosfera Ecuatorial	7
1.4.6. Caracterización del Contenido Total de Electrones (TEC)	8
1.4.7. Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS)	8
1.4.8. Rotacion de Faraday	11
2. Metodología	12
2.1. Cálculo del TEC	12
2.1.1. Retardos ionosféricos e índices de refracción	12
2.1.2. Pseudorange	13

2.1.3. Fase portadora	14
2.1.4. Cálculo del Ángulo de Rotación de Faraday	17
3. Resultados, conclusiones y recomendaciones	18
3.1. Resultados	18
3.1.1. Valores obtenidos del TEC	18
3.1.2. Relación entre el TEC y la Rotación de Faraday	24
3.1.3. Rotación de Faraday	25
3.1.4. Conclusiones y Recomendaciones	27
Bibliografía	30

Índice de figuras

1.1. Estructura de la ionosfera en un día de verano en una latitud media, y las principales bandas de radiaciones ionizantes solares y cósmicas. [5]	5
2.1. Gráfico para la obtención de TEC_v empleando el ángulo θ y el ángulo cenital χ [23]	16
3.1. El gráfico muestra todos los valores calculados del TEC, desde el año 2013 al 2023, para la estación de EPEC (Espe), ubicada en Pichincha.	18
3.2. En el gráfico se muestran todos los valores obtenidos del TEC para la estación SIEC (Santa Isabel), ubicada en Azuay, desde el año 2014 al 2023. Se observa una mayor consistencia de datos en comparación con la estación EPEC.	19
3.3. En este gráfico se muestran todos los valores obtenidos del TEC para la estación LJEC, ubicada en Loja, desde el año 2011 al 2022. Se evidencia una mayor falta de datos en comparación con las otras estaciones receptoras de señales GPS.	19
3.4. Se muestran todos los valores del TEC para la estación SNLR (San Lorenzo), ubicada en Esmeraldas, correspondiente a los años desde el 2011 al 2022. Esta estación fue seleccionada por su ubicación geográfica extrema en el norte de Ecuador	20

3.5. La figura muestra los valores obtenidos en el TEC para tres estaciones durante un periodo de 24 horas.	21
3.6. La figura muestra los valores obtenidos en el TEC para tres estaciones durante un periodo de una semana.	22
3.7. Gráfico del TEC para el periodo de un mes para tres estaciones.	22
3.8. Valores obtenidos del TEC para la estación de EPEC en el periodo de un año	23
3.9. Valores obtenidos del TEC para la estación de LJEC en el periodo de un año	23
3.10. Valores obtenidos del TEC para la estación de SIEC en el periodo de un año	23
3.11. Valores obtenidos para el ángulo de rotación de Faraday en función de los valores de TEC obtenidos para la estación SIEC, con las frecuencias $f_1 = 1575,42$ MHz y $f_2 = 1227,6$ MHz.	24
3.12. La gráfica muestran los valores del ángulo de rotación de Faraday y su variación temporal para la estación SIEC, así como los valores del ángulo de rotación de Faraday empleados en el cálculo de la media móvil con cada 100 datos, para la frecuencia $f_1 = 1575,42$ MHz.	25
3.13. La gráfica muestra el ángulo de rotación de Faraday obtenido para las estaciones SIEC (Santa Isabela) y SNLR (Esmeraldas) aplicando la media móvil cada 100 datos, basado en los valores de la frecuencia f_1	26
3.14. La gráfica muestra el ángulo de rotación de Faraday obtenido para las estaciones SIEC (Santa Isabela) y SNLR (Esmeraldas) aplicando la media móvil cada 100 datos, basado en los valores de la frecuencia f_2	26
3.15. Imagen de número de manchas solares obtenida de <i>Space Weather Live</i>	27

Capítulo 1

Descripción del componente desarrollado

La ionosfera, al ser ionizada por la radiación solar, desempeña un papel crucial en la propagación de ondas de radio, comunicaciones satelitales y observaciones celestes. La generación de electrones debido a la radiación solar, introducen retardos y desviaciones en las señales electromagnéticas, afectando la calidad de las observaciones astronómicas y el posicionamiento por satélites. [2, 20, 25]

1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo de investigación es aplicar un método preciso y efectivo para el cálculo del Contenido Total de Electrones (TEC) en la ionosfera sobre el territorio ecuatoriano, utilizando señales del sistema GPS. Posteriormente, utilizando los valores calculados del TEC junto con datos obtenidos del campo magnético en la línea ecuatorial, se determina el ángulo de rotación de Faraday experimentado por las señales GPS al atravesar la ionosfera sobre Ecuador.

1.2. Objetivos específicos

1. Examinar las variaciones temporales del TEC en distintas ubicaciones a lo largo del Ecuador, identificando patrones y comportamientos periódicos durante un período representativo.
2. Analizar la relación entre el Contenido Total de Electrones (TEC), el campo magnético en el Ecuador y la rotación de Faraday que experimentan las señales GPS al atravesar la ionósfera.
3. Investigar el comportamiento de la rotación de Faraday en la ionosfera en un periodo representativo y en diferentes ubicaciones geográficas del Ecuador, con el propósito de comprender las variaciones temporales y espaciales de este fenómeno en la región.

1.3. Alcance

El alcance de este trabajo se centra en el cálculo del Contenido Total de Electrones (TEC) utilizando archivos descargados del Instituto Geográfico Militar (IGM), los cuales se encuentran en formato RINEX. Estos archivos proporcionan datos de las señales GPS, las cuales atraviesan la ionosfera antes de llegar a los receptores terrestres. Los archivos en formato RINEX fueron tratados para obtener archivos TXT, donde se registra el valor correspondiente del TEC. Se utilizaron señales GPS debido a su ruta a través de la ionosfera, lo que las convierte en un indicador útil del TEC ionosférico.

Además, se obtuvieron datos del campo magnético terrestre de fuentes como INTERMAGNET para los mismos periodos de tiempo en los que se registraron los valores del TEC. Se llegó a calcular la rotación de Faraday experimentada por las señales GPS al atravesar la ionosfera, utilizando los datos del TEC y del campo magnético terrestre. Este análisis permite comprender las relaciones entre la actividad solar, las tormentas

geomagnéticas, las tormentas ionosféricas, el TEC ionosférico y el campo geomagnético, así como la rotación de Faraday en las señales de radio que atraviesan la ionosfera. El trabajo implica el uso de modelos matemáticos establecidos y la aplicación de técnicas de análisis de datos para derivar características de las variaciones de estos parámetros ionosféricos y así comprender mejor la dinámica de la ionosfera y su impacto en las señales GPS.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Estructura de la Ionosfera

La ionosfera es una sección de la atmósfera terrestre situada entre los 100 y los 1000 km de altitud, esta puede estudiarse como varias capas, entre las que destacan la D, E y F, cuyas densidades electrónicas varían con la altitud. Durante el día, la radiación solar intensa contribuye a la presencia de estas capas, mientras que la noche experimenta una disminución significativa debido a la reducción de la ionización por la radiación solar.

Este comportamiento de la ionosfera tiene implicaciones significativas en la propagación de ondas electromagnéticas, como se evidencia en los experimentos pioneros de Marconi en 1901 y la posterior confirmación de la existencia de capas ionizadas. [9] La ionosfera juega un papel crucial como medio dispersivo para las ondas electromagnéticas, especialmente en el rango de radiofrecuencias (3 KHz a 30 GHz). [7]

La ionosfera, más allá de su papel en las comunicaciones, también desempeña un papel crucial en la protección de la vida en la Tierra al filtrar la radiación nociva. Dada su complejidad y su relación intrínseca con factores como la latitud geomagnética, la ionosfera es un sistema físico cuyo estudio es esencial para comprender y mitigar posibles impactos en las comunicaciones y la preservación de la vida en nuestro planeta.

1.4.2. Plano vertical de la ionosfera

La fotoionización, impulsada por la radiación solar ultravioleta extrema (UVE), es el proceso principal que genera iones positivos y electrones libres en la ionosfera. La recombinación contrarresta la ionización, uniendo iones y electrones para formar átomos y moléculas neutras. La ionosfera baja se clasifica en capas D, E, F1 y F2, cuyo comportamiento está vinculado al ángulo cenital solar, mostrando variaciones diurnas, estacionales y latitudinales. [5]

Capa D (60-100 km): Durante el día, la radiación solar ioniza la capa, liberando electrones y exhibe densidades electrónicas de alrededor de $10^8 - 10^{10} e^-/cm^3$. En la noche, la radiación cósmica induce una disminución en los procesos ionizantes, y la capa puede desaparecer.

Capa E (110-160 km): Esta se ve afectada en mayor medida por las emisiones de rayos X producidas por el sol. Durante el día registra densidades electrónicas en el rango de $10^{11} e^-/cm^3$ y aunque suele disminuir durante la noche esta no desaparece.

Capa F1 (180-300 km): Es inversamente proporcional a la altitud con ionización principalmente por UVE. Más presente durante el día, su densidad muestra valores iniciales de alrededor de $10^{12} e^-/cm^3$, está influenciada por el ángulo solar central y es más significativa en verano.

Capa F2: La capa más alta y esencial para la propagación de ondas de alta frecuencia. Su ionización, también por UVE, está fuertemente ligada a la actividad solar y la geomagnética. [5, 18]

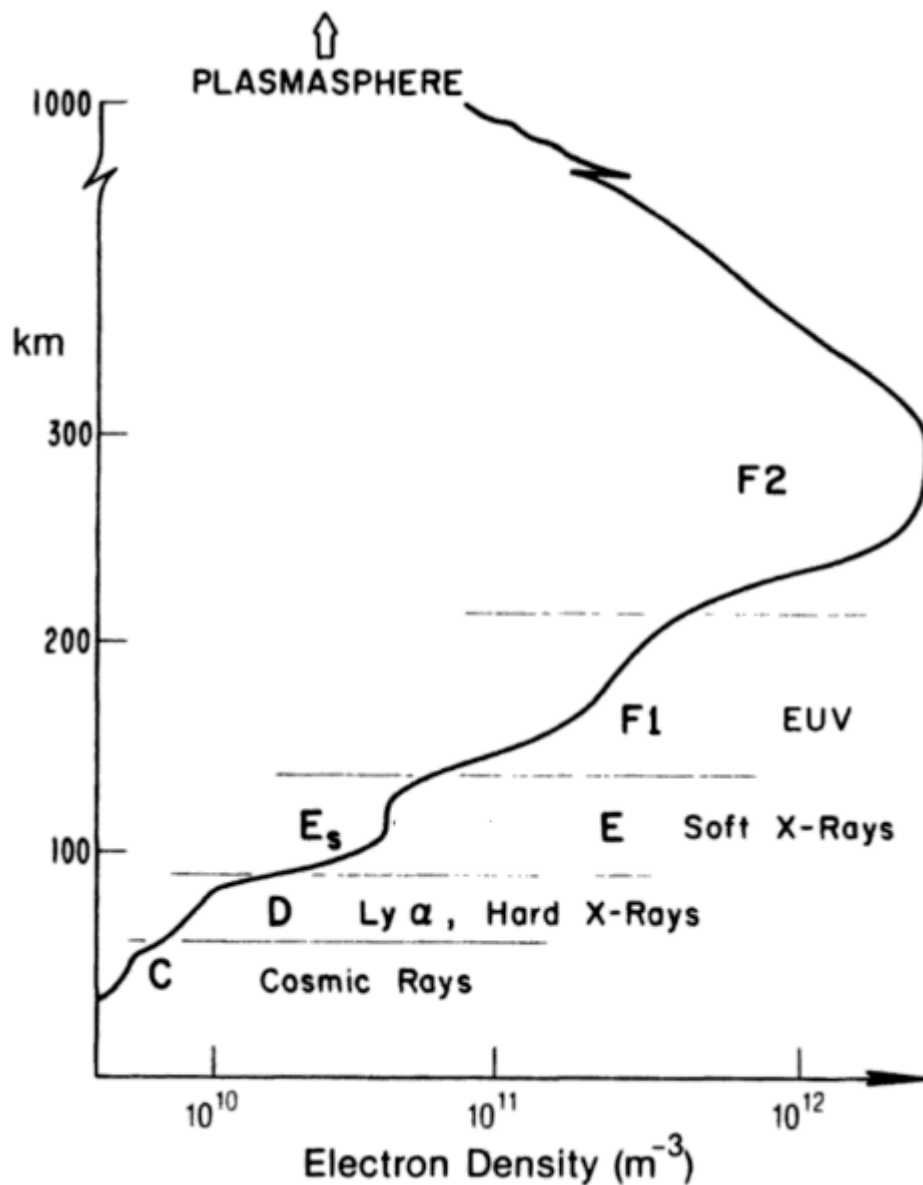


Figura 1.1: Estructura de la ionosfera en un día de verano en una latitud media, y las principales bandas de radiaciones ionizantes solares y cósmicas. [5]

1.4.3. Fenómenos Ionosféricos

Los fenómenos ionosféricos no solo son espectáculos cósmicos, sino también elementos clave para comprender la interacción entre la radiación solar, el campo magnético terrestre y nuestra atmósfera. Desde tormentas solares que desafían las comunicaciones hasta destellos de luz que revelan secretos electromagnéticos, la ionosfera se erige como un escenario donde la física celeste y terrestre se entrelazan en una coreografía

única. [19]

Tormentas Ionosféricas

Son tormentas desatadas por erupciones solares, su radiación solar extrema penetra hasta la capa D, afectando la capa F2 y alterando su frecuencia crítica. Los desvanecimientos de ondas cortas, cambios abruptos y complejas variaciones, muestran la respuesta dinámica de la ionosfera a la actividad solar. [25]

Tormentas Geomagnéticas

Cuando las corrientes de viento solar de alta velocidad interactúan con la magnetosfera terrestre, desencadenan tormentas geomagnéticas. Estos eventos provocan fluctuaciones intensas en el campo geomagnético, impactando la densidad de electrones y absorción de ondas de radio en la ionosfera inferior. [19,25]

1.4.4. Campo magnético de la tierra

Una de las teorías más respaldadas acerca del origen del campo magnético terrestre sugiere que la dinámica del núcleo terrestre, compuesto principalmente de hierro y níquel, generan el campo magnético que observamos en la superficie de nuestro planeta. Visualizamos inicialmente la Tierra como una esfera magnetizada de manera uniforme en la dirección de un eje dipolar central. Este eje cruza los polos (norte y sur), con un plano perpendicular al eje dipolar que forma el ecuador geomagnético. [5]

La descripción precisa del campo magnético terrestre en la comunidad científica utiliza la latitud de inmersión, referida a los polos magnéticos. Estos polos, llamados dipolos, son puntos donde el campo geomagnético es vertical a la superficie, mientras que en el ecuador, el campo es horizontal. [6]

Sin embargo, la realidad es que el campo magnético no es uniforme

en la superficie terrestre. En latitudes cercanas al ecuador, su intensidad es menor en comparación con latitudes mayores. La medición de la inclinación magnética y la declinación magnética proporciona información crucial. La inclinación mide el ángulo entre las líneas de campo y la horizontal, mientras que la declinación mide el ángulo respecto a los polos geográficos.

1.4.5. Impacto de las Señales de Radiofrecuencia en la Ionosfera Ecuatorial

Múltiples factores como la radiación solar y la influencia del campo magnético da como resultado que en la región ecuatorial se presenten niveles elevados de densidad electrónica en la ionosfera.

Cuando a través de la ionosfera se propaga una señal de radio se producen una serie de efectos derivados de la interacción con las partículas cargadas presentes en esta capa atmosférica. Estos efectos, conocidos como retardos ionosféricos, se manifiestan cuando las distintas frecuencias que conforman la señal se desvían en múltiples direcciones debido a las fluctuaciones en la densidad de electrones presentes en la ionosfera. Esta dispersión puede generar distorsiones y pérdida de intensidad en la señal, lo que provoca que su recepción no sea precisa y clara. [11] [22]

Además de estos efectos, existen otros fenómenos que pueden influir en las señales electromagnéticas. Por ejemplo, el ciclo de actividad solar, con una periodicidad aproximada de 11 años, ejerce una influencia significativa en la densidad de electrones de la ionosfera. Por otro lado, las tormentas ionosféricas, aunque no exhiben un patrón cíclico definido, también desempeñan un papel crucial. Estas tormentas, originadas principalmente por las erupciones solares, irradian grandes cantidades de energía que atraviesan la ionosfera, provocando alteraciones considerables en su composición y comportamiento. [11]

1.4.6. Caracterización del Contenido Total de Electrones (TEC)

Matemáticamente, el TEC se calcula como la integral de la densidad de electrones $N(s)$ a lo largo de la distancia ds entre dos puntos, A y B (receptor y un satélite):

$$TEC = \int_A^B N(s) ds$$

Esta magnitud se expresa en unidades TECU (1 TECU = $10^{16} e/m^2$) y se determina mediante datos pseudorange y fase portadora de señales GPS. [21, 24]

1.4.7. Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS)

El sistema de posicionamiento global por satélite (GPS) se basa en el ingenioso proceso de emitir constantemente señales de radiofrecuencia desde los satélites en órbita terrestre hacia receptores ubicados en su superficie. Este proceso se fundamenta en la precisión de los relojes de los satélites, que permiten sincronizar la emisión de las señales.

Al considerar que los satélites permanecen estáticos durante un período suficientemente largo, se puede calcular el vector espacial relativo ρ_s de cada satélite con respecto al centro de la Tierra. Por otro lado, el receptor en la Tierra se define mediante su vector de posición geocéntrica ρ_r . Este receptor, equipado con un reloj preciso que ajusta la hora del sistema, registra con exactitud la distancia geométrica o rango ρ asociado a cada satélite, medida por el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor. [14] [17] [15]

La distancia ρ se calcula como la norma del vector diferencia entre la posición del satélite y la posición del receptor:

$$\rho = \|\rho_s - \rho_r\|. \quad (1.1)$$

Al recibir señales de múltiples satélites, el receptor calcula la dife-

rencia de tiempo entre las señales recibidas y las transmitidas por los satélites. Esta diferencia se convierte en una medida de distancia en unidades de tiempo, esencial para determinar la posición del receptor. Esta diferencia no es exacta, por lo que para corregir su error se suma la corrección de distancia $\Delta\rho = c\delta$ a la distancia ρ , donde c es la velocidad de la luz y δ representa el tiempo adicional causado por el retardo del reloj.

El cálculo de la posición del receptor se basa en la intersección de esferas imaginarias centradas en cada satélite, donde el receptor se encuentra en el punto de intersección de estas esferas. La precisión del sistema de posicionamiento satelital depende de la sincronización de las señales que utilizan relojes altamente precisos, que operan en dos frecuencias fundamentales: $f_1 = 1575,42$ MHz y $f_2 = 1227,6$ MHz. [17] [15]

Es importante tener en cuenta que los electrones presentes en la ionosfera causan retardo en las señales que atraviesan la atmósfera terrestre, lo que provoca desviaciones en la señal que llega al receptor. Este análisis de TEC (Contenido Total de Electrones) permite corregir estas desviaciones y garantizar la precisión del sistema de posicionamiento global por satélite.

La ecuación de Appleton-Hartree (ecuación 1.2) nos permite esta interacción mediante el índice de refracción de la ionosfera al considerarla como un medio refractivo.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{(1 - jZ) - \frac{Y_T^2}{2(1-X-jZ)} \pm \left(\frac{Y_T^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y_L^2 \right)^{1/2}} \quad (1.2)$$

con, $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} = \frac{f_N^2}{f^2}$; $Y = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{f_H}{f}$; $Y_L = \frac{\omega_L}{\omega}$, $Y_T = \frac{\omega_T}{\omega}$; $Z = \frac{\omega_C}{\omega}$.

$$\begin{aligned}
X &= \frac{f_N^2}{f^2} = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} \\
Y &= \frac{f_H}{f} = \frac{\omega_H}{\omega} \\
Y_L &= \frac{f_L}{f} \\
Y_T &= \frac{f_T}{f} \\
Z &= \frac{f_C}{f}
\end{aligned}$$

En donde se tiene;

- ω es la frecuencia angular de la onda portadora.
- ω_C es la frecuencia angular de colisión.
- ω_H es la frecuencia angular del ciclotrón, y ω_L y ω_T son, a su vez, las frecuencias longitudinales y transversales el ciclotrón.
- ω_N es la frecuencia angular del plasma ionosférico, donde $\omega_N = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e}}$, con una concentración electrónica N , carga electrónica e , masa electrónica m_e y permitividad dieléctrica del vacío ϵ_0 . [10, 15]

En la ionosfera, las ondas electromagnéticas experimentan un fenómeno peculiar conocido como efecto Faraday, donde el plano de polarización de la onda se desvía debido a la presencia de un campo magnético alineado con su dirección de propagación. Según la teoría magneto-óptica, una onda electromagnética plana puede descomponerse en dos componentes: una onda ordinaria (signo “+” en la ecuación (1.2)), en la que el campo eléctrico y el campo magnético están alineados, y una onda extraordinaria (signo “-” en la ecuación (1.2)), donde el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético.

En el caso de la onda ordinaria, el campo eléctrico afecta a los electrones que se mueven paralelamente al campo magnético, mientras que este último no ejerce influencia debido a su orientación. Por otro lado, en la onda extraordinaria, el campo eléctrico influye en los electrones que

se mueven perpendicularmente al campo magnético, y en este escenario, el campo magnético juega un papel activo al ejercer fuerza sobre los electrones, alterando así su trayectoria. [3] [13]

1.4.8. Rotacion de Faraday

En 1845, Michael Faraday hizo un descubrimiento revolucionario al observar que la polarización de una onda linealmente polarizada se altera al atravesar un campo magnético, dando lugar a lo que hoy conocemos como la rotación de Faraday. Esta rotación está representada por la expresión matemática:

$$\Omega = \frac{e^3}{8\pi^2 c \epsilon_0 m_e^2 f^2} \int_A^B n_e B \cos(\chi) ds \quad (1.3)$$

Con c es la velocidad de la luz en el vacío, B campo magnético y n_e densidad electrónica. [1]

La magnitud de la rotación de Faraday no solo está vinculada a la intensidad del campo magnético, sino que también guarda una relación directa con la densidad de carga presente en el medio. Esta interesante propiedad ha abierto las puertas para aplicaciones diversas, entre ellas, el mapeo de la ionosfera. [8]

Capítulo 2

Metodología

2.1. Cálculo del TEC

Inicialmente se debe llegar a calcular el índice de refracción que experimentan las señales tanto el índice de refracción de grupo y de fase, estos serán empleados para el calculo del retardo ionosférico.

2.1.1. Retardos ionosféricos e índices de refracción

Si a la ecuación 1.2 la representamos como serie de Taylor se tiene

$$n \approx 1 - \frac{1}{2}X \pm \frac{1}{2}XY|\cos(\theta)| - \frac{1}{8}X^2 - \frac{1}{4}XY^2(1 + \cos^2(\theta)) + \dots \quad (2.1)$$

Cuando se considera que las colisiones y el campo magnético son insignificantes, solamente se usan los dos primeros términos de la ecuación 2.1, entonces:

$$n = 1 - \frac{1}{2}X = 1 - \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m \omega^2} \quad (2.2)$$

El retardo ionosférico es calculado mediante la siguiente integral.

$$d_{ion} = \int_{satelite}^{receptor} (n - 1) ds \quad (2.3)$$

A partir de aquí podemos emplear el índice de refracción de fase y de grupo n_p y n_g respectivamente. [26] [10]

$$\begin{aligned} d_{ion,p} &= \int_{sat}^{rec} (n_p - 1) ds \\ &= -\frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega^2} \int_{sat}^{rec} N ds \\ &= -\frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega^2} TEC \\ &= -\frac{40,3}{f^2} TEC \end{aligned} \quad (2.4)$$

y

$$\begin{aligned} d_{ion,g} &= \int_{sat}^{rec} (n_g - 1) ds \\ &= \frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega^2} \int_{sat}^{rec} N ds \\ &= \frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega^2} TEC \\ &= \frac{40,3}{f^2} TEC \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.1.2. Pseudorange

El pseudorange, medido en unidades de longitud, corresponde a la distancia desde la antena receptora hasta la antena del satélite. Se calcula estimando el tiempo de viaje de la señal y multiplicándolo por la velocidad de la luz en el vacío. Sin embargo, debido a la deriva en la escala de tiempo de los relojes en el satélite y el receptor, se produce un error en esta medición, lo que origina el término "pseudorange". Las ecuaciones que modelan este pseudorange para el sistema GPS se presentan de la siguiente manera: [4] [12]

$$P_i = \rho + c [dt - dT] + d_{ion,i} + d_{trop} + \epsilon_i \quad (2.6)$$

Donde

- $i = 1, 2$ debido a que tenemos dos frecuencias fundamentales f_1 y f_2
- ρ es corresponde al rango geométrico entre el receptor y satélite.
- c velocidad de la Luz en el vacío.
- dt desfase de tiempo para el receptor.
- dT desfase de tiempo para el satélite.
- $d_{ion,i}$ retardo ionosférico de la frecuencia i -esima.
- d_{trop} retraso producido en la troposfera.
- ϵ_i error en las señales.

Trabajemos la expresión $P_1 - P_2$

$$P_1 - P_2 = d_{ion,1} - d_{ion,2} + (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (2.7)$$

El aporte del termino entre paréntesis no llegan a tener una influencia significativa para el calculo del TEC por lo que al despreciar este termino y emplear la ecuación 2.5 tenemos:

$$P_1 - P_2 = \frac{40,3}{f_1^2} TEC - \frac{40,3}{f_2^2} TEC \quad (2.8)$$

Finalmente podemos encontrar la expresión para el TEC en función de los pseudorango como:

$$TEC_p = \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \frac{P_1 - P_2}{40,3} \quad (2.9)$$

2.1.3. Fase portadora

La fase portadora representa la diferencia entre la fase de la señal portadora recibida del satélite y la fase generada por el receptor, medida en términos de ciclos completos. La formula para la fase portadora i -esima

sera:

$$\phi_i \lambda_i = \rho + c(dt - dT) - d_{ion,g,i} + d_{trop} + \lambda_i N_i + \gamma_{\phi_i} + \epsilon_i \quad (2.10)$$

De igual manera que en el pseudorange hablamos de 2 fases portadoras $i = 1, 2$, donde los nuevos términos son:

- λ_i longitud de onda
- N_i ambigüedad de ciclo
- γ_i error instrumental

Finalmente para obtener una estimación a partir de la fase portadora tenemos:

$$\begin{aligned} \phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 &= d_{ion,g,1} - d_{ion,g,2} \\ &= 40,3 \left(\frac{TEC_\phi}{f_2^2} - \frac{TEC_\phi}{f_1^2} \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

finalmente,

$$TEC_\phi = \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \frac{\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2}{40,3} \quad (2.12)$$

Empleando las ecuaciones 2.9 y 2.12, podemos derivar una expresión para el Contenido Total de Electrones (TEC_c) a lo largo del recorrido de la señal, conocido como TEC vertical. Esta magnitud representa la densidad total de electrones en la ionosfera a lo largo del camino entre el satélite y el receptor. Dado que los datos son recolectados de varios satélites, estos presentan diferentes ángulos de elevación, el cual sera empleado para calcular el contenido total de electrones de forma vertical (TEC_v): [25] [27] [10] [16]

$$TEC_v = TEC_c \cos\theta \quad (2.13)$$

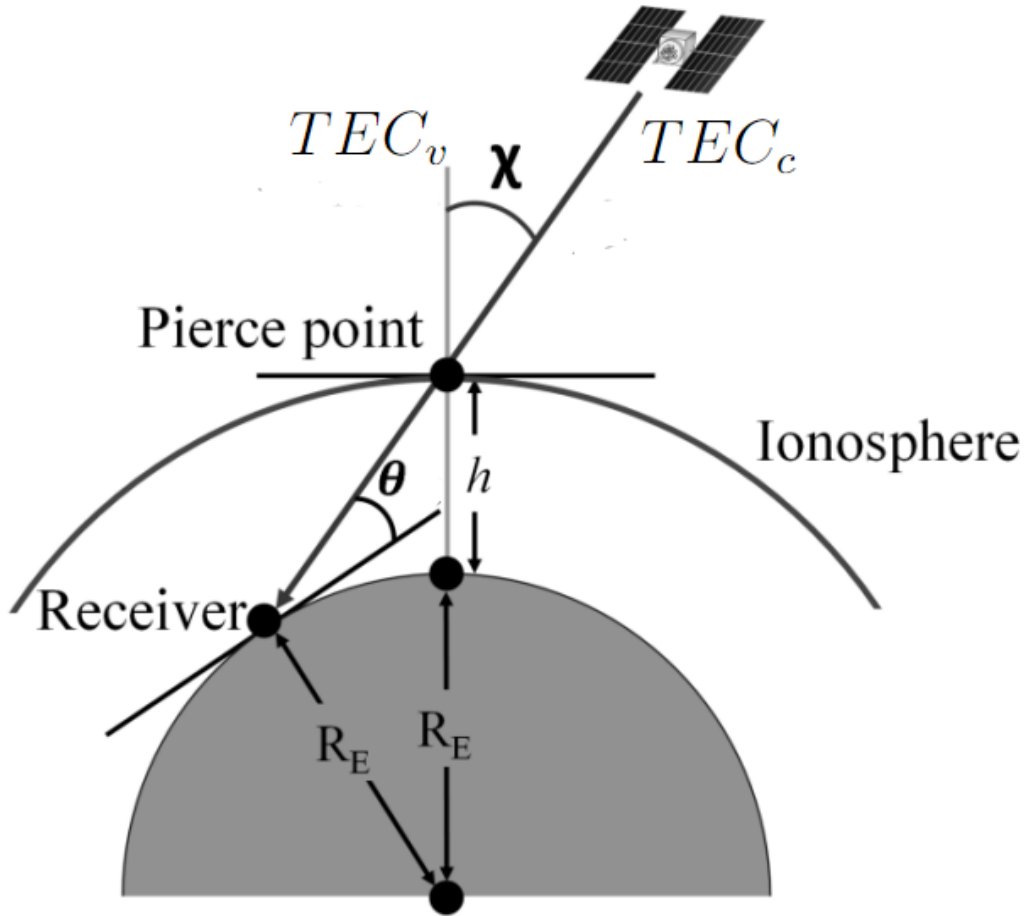


Figura 2.1: Gráfico para la obtención de TEC_v empleando el ángulo θ y el ángulo cenital χ [23]

La relación entre θ y el ángulo cenital de la estación receptora está dado por $\theta = 90^\circ - \chi$, y empleando la geometría mostrado en Figura 2.1 podemos obtener la siguiente relación:

$$\sin\theta = \frac{R_E}{R_E + h} \quad (2.14)$$

Con R_E el radio de la tierra y h la altura media de la ionosfera. No obstante, al momento de recolectar los datos se encontró inconsistencias en la regularidad de los datos para la fase portadora. En otras palabras, se identificaron períodos de tiempo que abarcaban días, semanas e incluso meses en los cuales no se disponía de datos de fase portadora. De tal manera que la expresión calculada en este trabajo corresponde a un promedio de TEC_p . [7]

2.1.4. Cálculo del Ángulo de Rotación de Faraday

Empleando la ecuación 1.3 podemos llegar a la siguiente relación entre el campo magnético, el TEC y la rotación de Faraday:

$$\Omega = \frac{e^3}{8\pi^2 c \epsilon_0 m_e^2 f^2} TEC \langle B \rangle \quad (2.15)$$

Así para realizar este calculo se emplearon dos conjuntos de datos: valores del campo magnético y los valores del Contenido Total de Electrones (TEC) calculados a partir de estaciones GPS distribuidas en la zona ecuatorial del Ecuador. [1, 8]

Los datos del campo magnético fueron obtenidos de la red de observatorios magnéticos INTERMAGNET. Esta red proporciona mediciones precisas y continuas del campo magnético terrestre en diferentes ubicaciones alrededor del mundo. Para este estudio, se emplearon valores específicos de la zona ecuatorial.

Con los datos del campo magnético y del TEC disponibles, se procedió a calcular el ángulo de rotación de Faraday para cada conjunto de datos. Este análisis permitió investigar las variaciones en el ángulo de rotación de Faraday en función de la ubicación geográfica en el Ecuador y de los cambios en la actividad geomagnética y ionosférica.

El empleo de estos conjuntos de datos y la aplicación de técnicas de análisis permitieron obtener información detallada sobre la relación entre el campo magnético terrestre, el Contenido Total de Electrones en la ionosfera y la rotación de Faraday en las señales GPS, contribuyendo así al entendimiento de los fenómenos ionosféricos y su impacto en las comunicaciones por satélite y otras aplicaciones tecnológicas.

Capítulo 3

Resultados, conclusiones y recomendaciones

3.1. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio del Contenido Total de Electrones (TEC) y de la Rotación de Faraday que sufren las señales GPS. Además, se analiza la relación entre el TEC y la rotación de Faraday.

3.1.1. Valores obtenidos del TEC

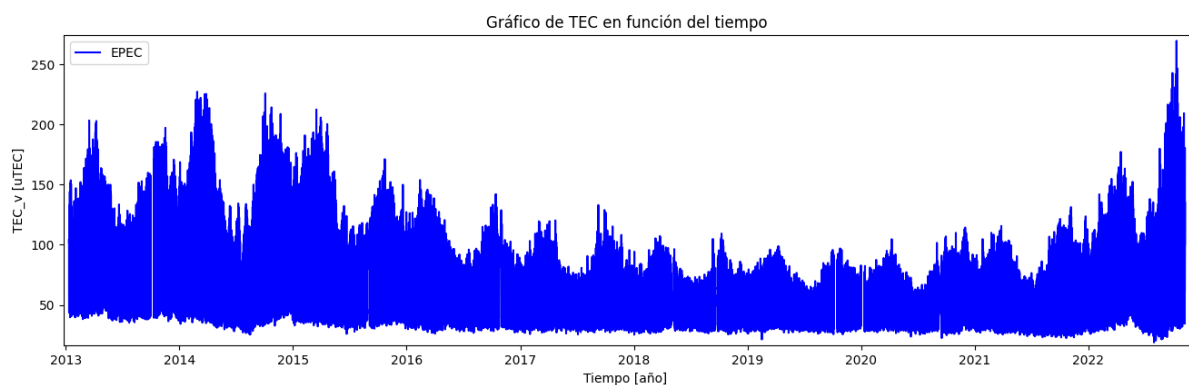


Figura 3.1: El gráfico muestra todos los valores calculados del TEC, desde el año 2013 al 2023, para la estación de EPEC (Espe), ubicada en Pichincha.

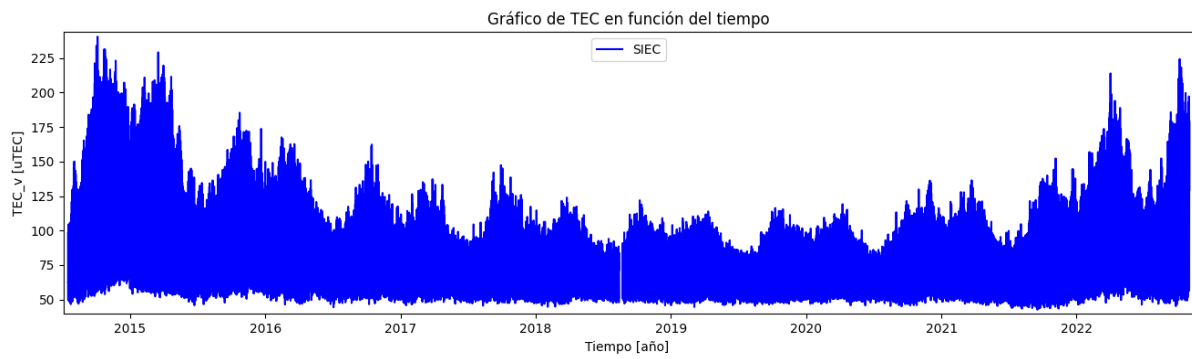


Figura 3.2: En el gráfico se muestran todos los valores obtenidos del TEC para la estación SIEC (Santa Isabel), ubicada en Azuay, desde el año 2014 al 2023. Se observa una mayor consistencia de datos en comparación con la estación EPEC.

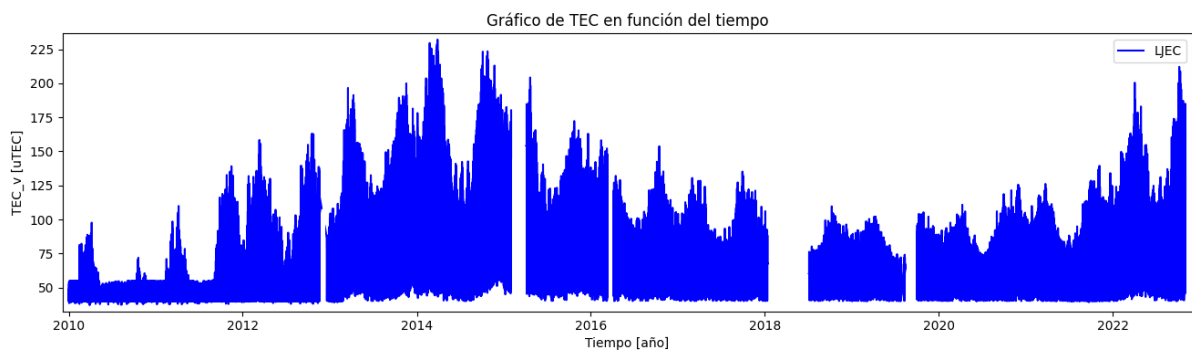


Figura 3.3: En este gráfico se muestran todos los valores obtenidos del TEC para la estación LJEC, ubicada en Loja, desde el año 2011 al 2022. Se evidencia una mayor falta de datos en comparación con las otras estaciones receptoras de señales GPS.

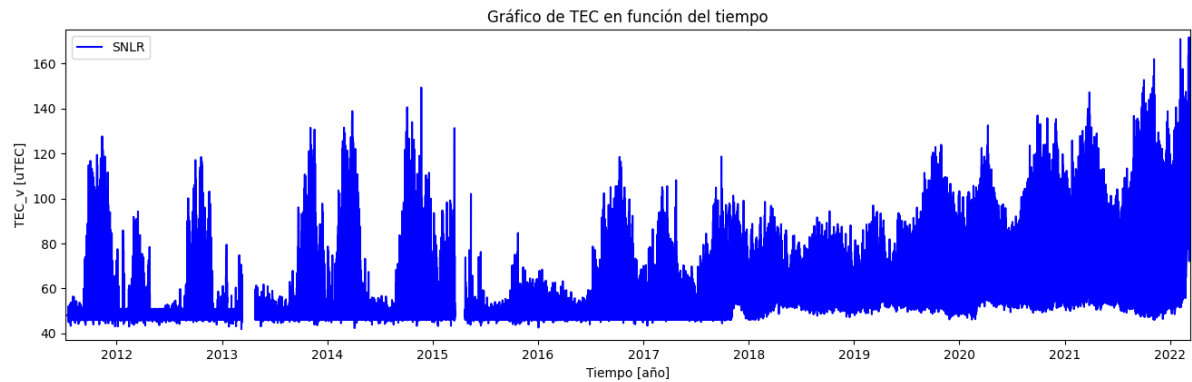


Figura 3.4: Se muestran todos los valores del TEC para la estación SNLR (San Lorenzo), ubicada en Esmeraldas, correspondiente a los años desde el 2011 al 2022. Esta estación fue seleccionada por su ubicación geográfica extrema en el norte de Ecuador

En las figuras 3.1; 3.2; 3.3 y 3.4 se presentaron todos los datos obtenidos de cuatro estaciones receptoras de señales GPS: EPC, SIEC, LJEC y SNLR respectivamente. Se puede observar que se registran valores más altos para los años 2013, 2014 y 2015, así como para los años 2022 y 2023. El análisis de los registros de datos, muestra que la estación SIEC es más consistente en la recopilación de datos a lo largo del tiempo. Esta ubicada al sur del Ecuador. Esta consistencia resalta la importancia de los datos obtenidos de la estación SIEC para futuros análisis y aplicaciones en estudios relacionados con el posicionamiento global y monitoreo de la ionosfera terrestre.

TEC Diario

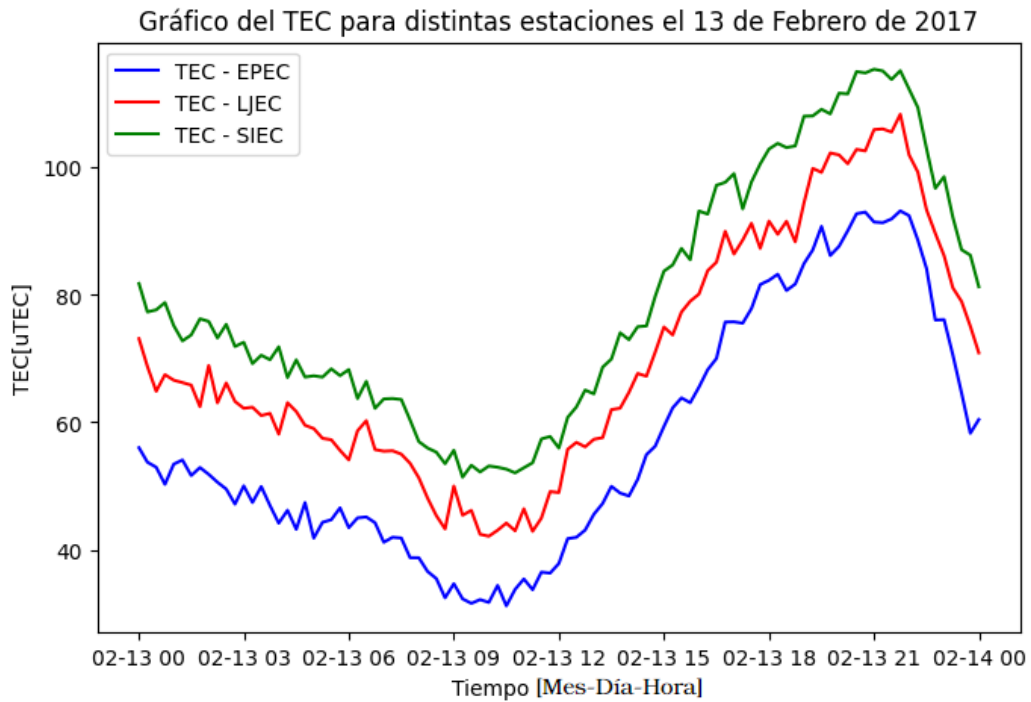


Figura 3.5: La figura muestra los valores obtenidos en el TEC para tres estaciones durante un periodo de 24 horas.

La Figura 3.5 muestra el comportamiento del TEC a lo largo de un día. Se observa que los valores del TEC son mayores durante el día en comparación con la noche, lo que es consistente con la ionización atmosférica causada por la radiación solar. Además, los valores diarios del TEC pueden alcanzar máximos sobre los 100 UTEC, lo que confirma el hecho de que en la zona ecuatorial los valores del TEC son mayores que en otras latitudes debido a la mayor ionización de la ionósfera y a la influencia del campo magnético que da lugar al efecto FUENTE en las cercanías del ecuador magnético.

TEC Semanal

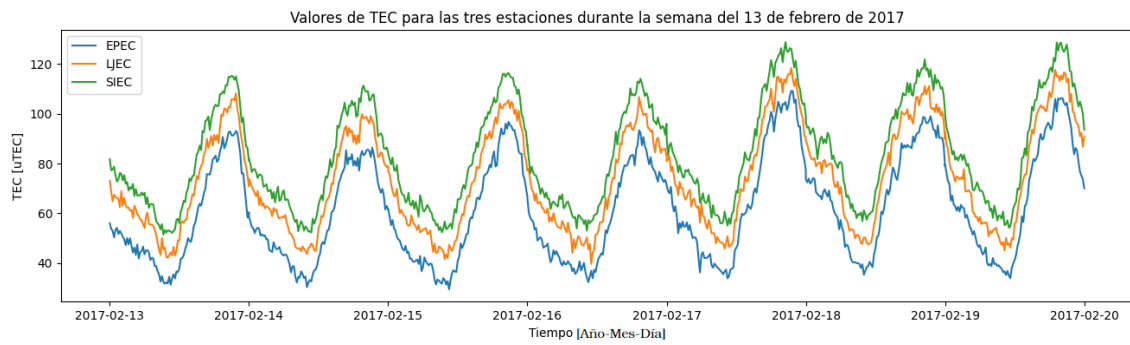


Figura 3.6: La figura muestra los valores obtenidos en el TEC para tres estaciones durante un periodo de una semana.

La Figura 3.6 muestra el comportamiento del TEC a lo largo de una semana. Se observa un patrón periódico en el TEC, con valores más altos durante el día y valores más bajos durante la noche. Este patrón se repite a lo largo de la semana.

TEC Mensual

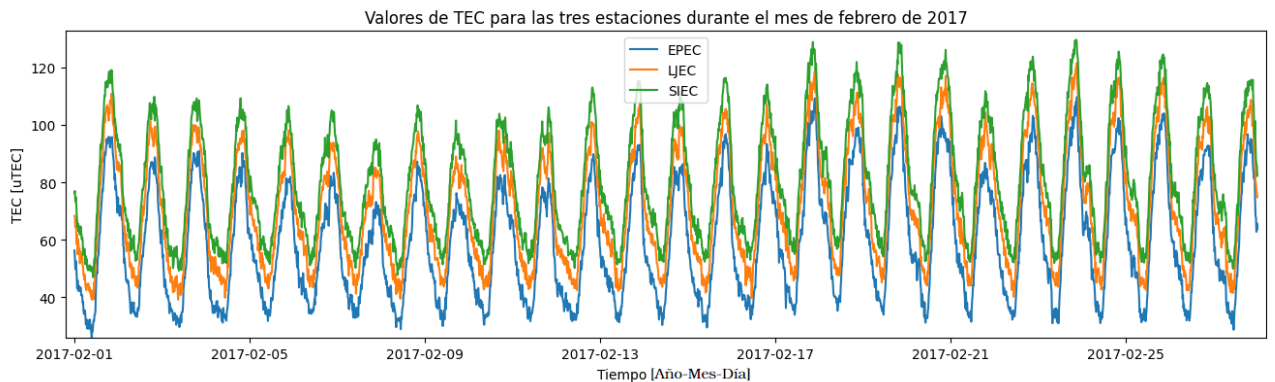


Figura 3.7: Gráfico del TEC para el periodo de un mes para tres estaciones.

La Figura 3.7 muestra el comportamiento del TEC a lo largo de un mes. Se observan patrones más complejos en el TEC, con máximos y mínimos que se repiten a lo largo del mes.

TEC Anual

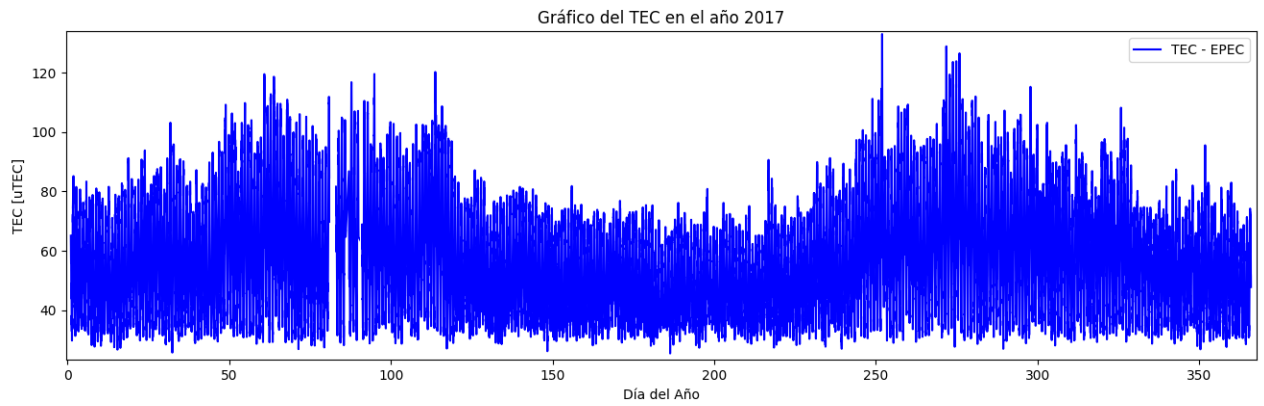


Figura 3.8: Valores obtenidos del TEC para la estación de EPEC en el periodo de un año

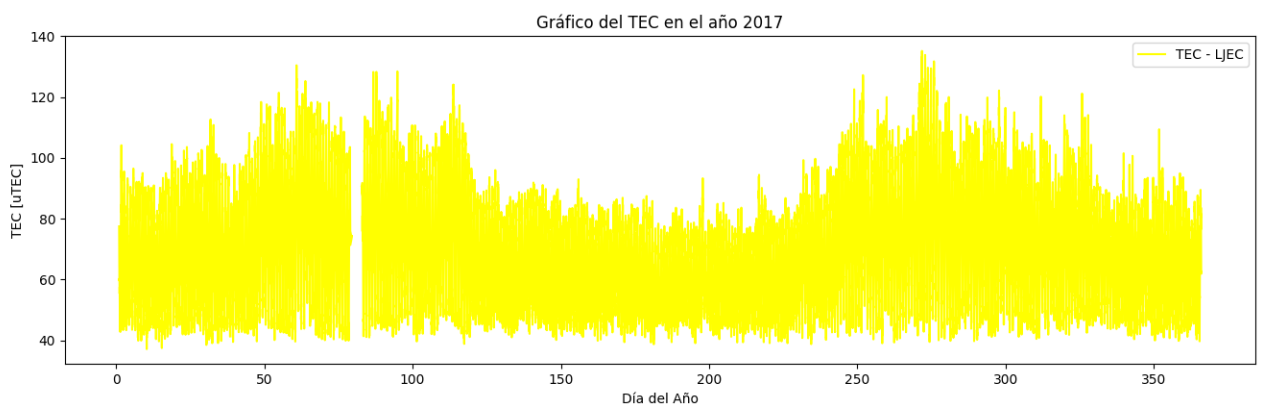


Figura 3.9: Valores obtenidos del TEC para la estación de LJEC en el periodo de un año

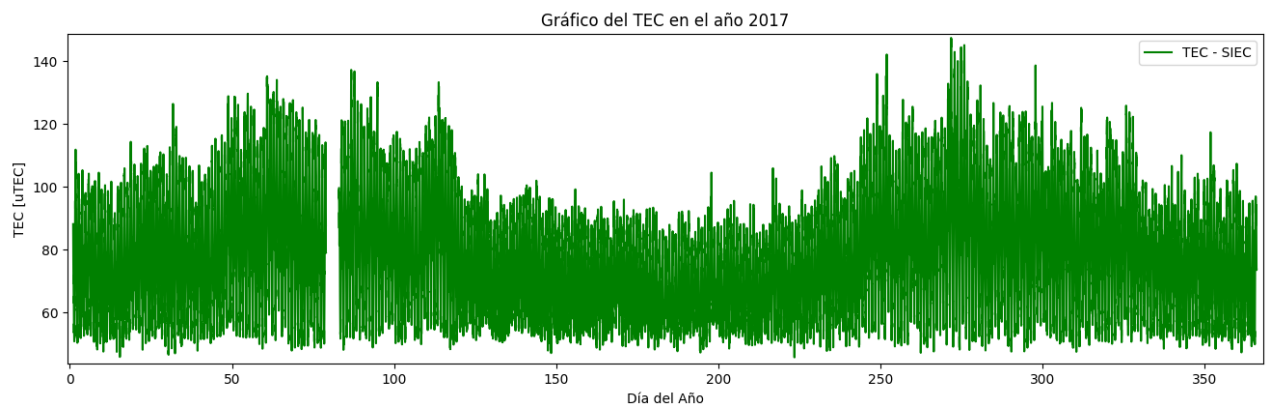


Figura 3.10: Valores obtenidos del TEC para la estación de SIEC en el periodo de un año

Las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 muestra el comportamiento del TEC a lo largo de un año. Se observan patrones de largo plazo en el TEC, con má-

ximos y mínimos más notorios. Estos patrones pueden estar relacionados con la variabilidad solar y cambios de estaciones climáticas.

Estas gráficas proporcionan una visión general del comportamiento del TEC en diferentes escalas temporales, lo que contribuye a comprender mejor las condiciones de la ionosfera y sus efectos en las comunicaciones por satélite y otras aplicaciones tecnológicas.

3.1.2. Relación entre el TEC y la Rotación de Faraday

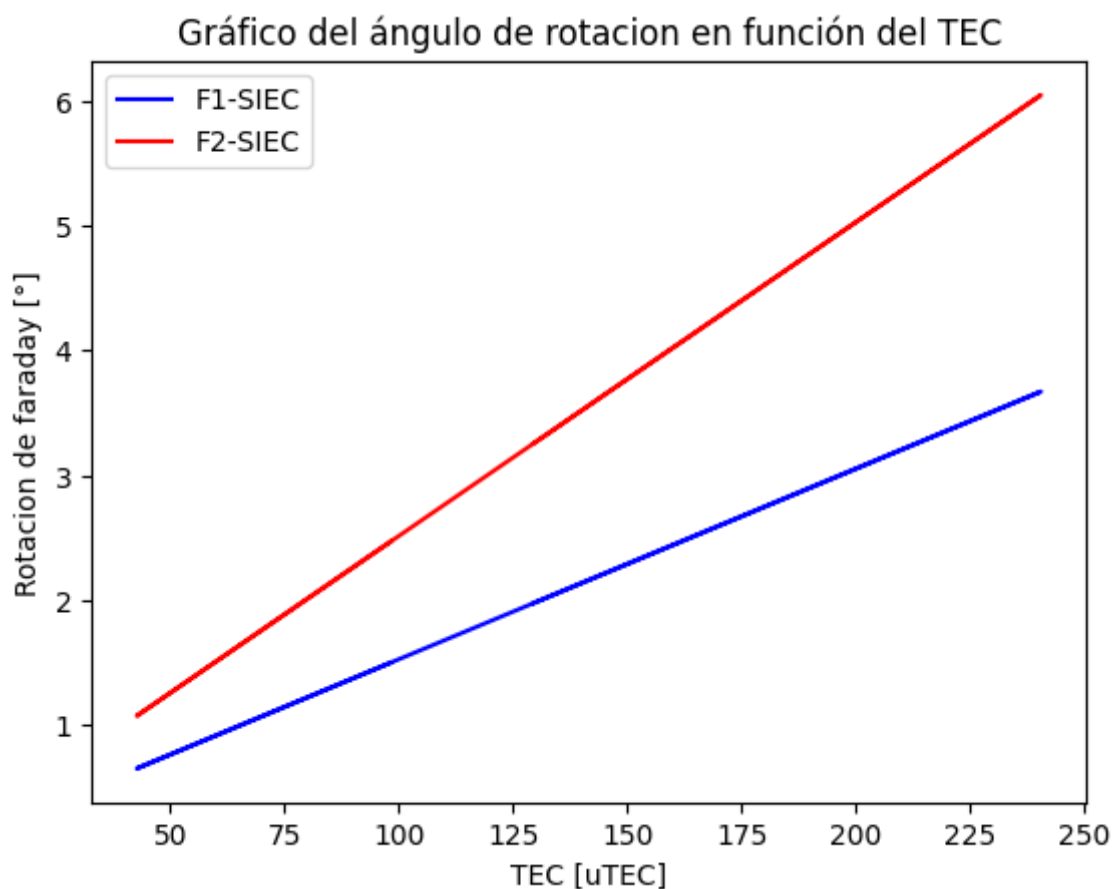


Figura 3.11: Valores obtenidos para el ángulo de rotación de Faraday en función de los valores de TEC obtenidos para la estación SIEC, con las frecuencias $f_1 = 1575,42$ MHz y $f_2 = 1227,6$ MHz.

La Figura 3.11 muestra la relación entre el TEC y la rotación de Faraday, evidenciando una relación lineal entre estos datos, como se esperaba de la ecuación 2.15. Los valores más altos del TEC coinciden con mayores

valores de rotación de Faraday, y viceversa.

3.1.3. Rotación de Faraday

Dado que existe una relación lineal entre el ángulo de rotación de Faraday y el número de electrones en la ionosfera, es de esperar que el comportamiento del ángulo de rotación al pasar el tiempo tenga un comportamiento muy similar al descrito por los valores de TEC en el tiempo. Para este análisis, se seleccionó la estación de SIEC debido a su ubicación geográfica en el ecuador. Empleando la media móvil en 100 datos, obtenemos la siguiente gráfica. Esta metodología permite suavizar las fluctuaciones y resaltar las tendencias generales en el comportamiento del ángulo de rotación de Faraday a lo largo del tiempo y entre distintas ubicaciones geográficas.

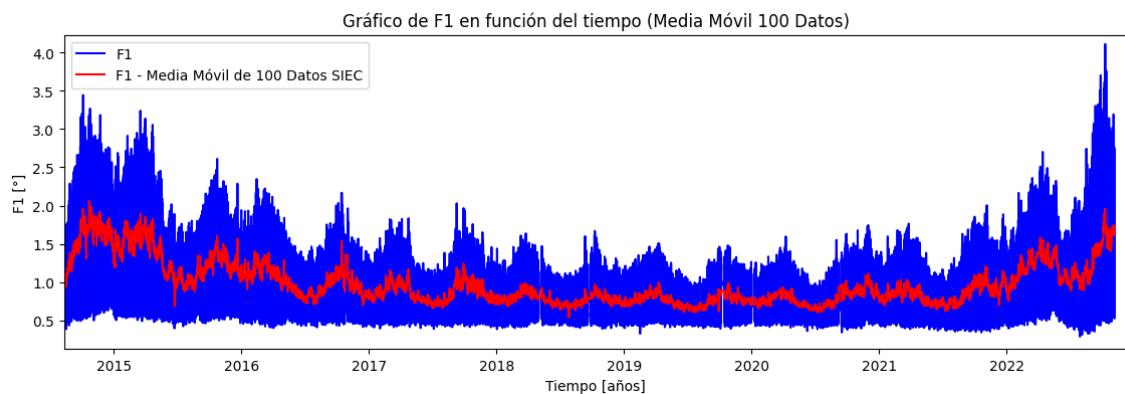


Figura 3.12: La gráfica muestran los valores del ángulo de rotación de Faraday y su variación temporal para la estación SIEC, así como los valores del ángulo de rotación de Faraday empleados en el cálculo de la media móvil con cada 100 datos, para la frecuencia $f_1 = 1575,42MHz$.

A continuación se muestran los valores obtenidos para el ángulo de rotación de Faraday que experimentan las señales de radio con frecuencias f_1 y f_2 utilizadas por los GPS. Con el fin de facilitar la comparación de estos valores entre diferentes estaciones, se aplicó la técnica estadística de medias móviles cada 100 datos.

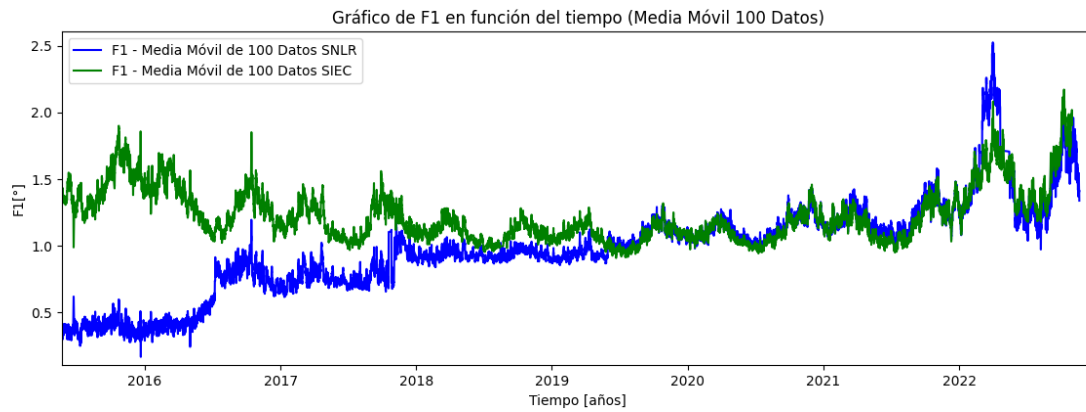


Figura 3.13: La gráfica muestra el ángulo de rotación de Faraday obtenido para las estaciones SIEC (Santa Isabela) y SNLR (Esmeraldas) aplicando la media móvil cada 100 datos, basado en los valores de la frecuencia f_1 .

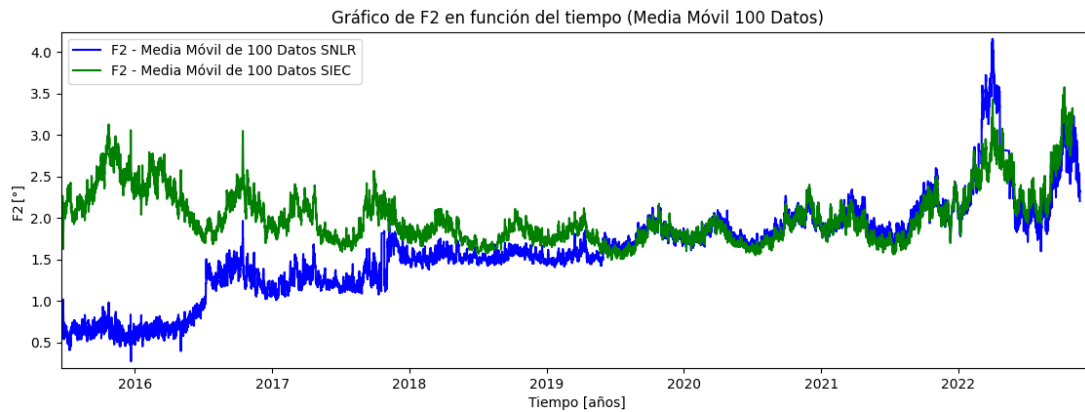


Figura 3.14: La gráfica muestra el ángulo de rotación de Faraday obtenido para las estaciones SIEC (Santa Isabela) y SNLR (Esmeraldas) aplicando la media móvil cada 100 datos, basado en los valores de la frecuencia f_2 .

Las manchas solares son regiones del Sol con alta actividad magnética. Podemos observar en la imagen de *Space Weather Live* que los años con mayor número de manchas solares corresponden a periodos en los cuales se obtuvieron valores más altos de rotación de Faraday (ver Figura 3.15). Este análisis se ha podido realizar gracias a que se dispone de datos recopilados durante un periodo mayor a 10 años, lo que ha permitido calcular los valores de rotación de Faraday de manera precisa (ver Figura 3.12).

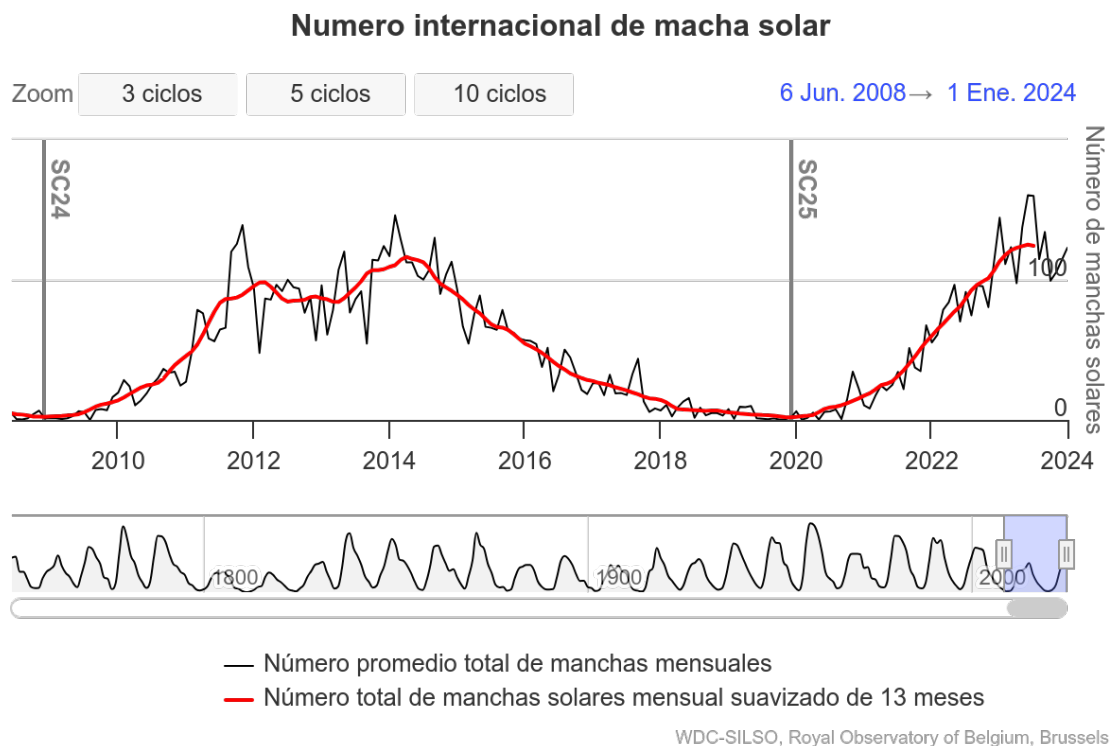


Figura 3.15: Imagen de número de manchas solares obtenida de *Space Weather Live*.

3.1.4. Conclusiones y Recomendaciones

Observamos que existe una relación directamente proporcional entre el Contenido Total de Electrones (TEC) de la ionosfera y la rotación de Faraday que sufren las señales de radio que atraviesan la misma. A partir del análisis del TEC, se observa claramente un patrón diario, con un aumento durante el día y una disminución durante la noche, debido a la influencia solar. Sin embargo, al ampliar el período de estudio a un año, se observará una mayor variabilidad en los valores del TEC, especialmente en los días intermedios del año, lo cual sugiere la influencia de factores estacionales como la variabilidad en la radiación solar debido a los cambios en la inclinación de la Tierra.

Al extender el análisis a períodos de más de 10 años, se identificó una clara relación entre el TEC y la actividad solar. Los años con mayor número de manchas solares coincidieron con los años de mayor TEC y ángulo de rotación Faraday, mientras que los años con menor actividad solar mostraron valores más bajos de TEC y del ángulo de rotación de

Faraday. Esto resalta la importancia del TEC y la rotación de Faraday como parámetros relevantes para caracterizar la ionósfera sobre el territorio ecuatoriano y su relación con fenómenos naturales como la actividad solar y la ocurrencia de las estaciones climáticas anuales.

La rotación de Faraday, tiene un comportamiento directamente proporcional al TEC, lo que evidencia la relación teórica establecida entre estas dos variables. La realización del estudio en diversas ubicaciones geográficas ecuatoriales podría permitir correcciones más precisas en las señales de radio, lo que sería beneficioso para aplicaciones como la navegación por satélite, el posicionamiento y las comunicaciones.

En las figuras 3.13 y 3.14 se puede observar que los valores obtenidos del ángulo de rotación de Faraday muestran comportamientos distintos para diferentes ubicaciones a lo largo del Ecuador. Este fenómeno se debe en gran medida a la ubicación geográfica de las estaciones receptoras. Por ejemplo, la estación ubicada al norte (Esmeraldas) se encuentra más cerca de la línea ecuatorial, lo que puede influir en las mediciones del TEC y la rotación de Faraday en comparación con otras estaciones situadas más al sur. El campo magnético en las dos localidades es diferente y es en realidad el causante de las diferencias observadas en los valores del ángulo de rotación de Faraday, diferencias que son más evidentes en los años comprendidos entre el 2015 y el 2020.

Sin embargo, uno de los principales desafíos encontrados durante la investigación fue la falta de datos en varios períodos de tiempo en algunas estaciones receptoras, lo que limitó la capacidad de realizar correcciones necesarias, especialmente cuando se consideran diferentes ubicaciones geográficas. Se recomienda abordar este desafío mediante la implementación de estrategias para recopilar datos de una manera más rigurosa y sistemática y así obtener series de datos más completas y consistentes en todas las estaciones receptoras. El uso de técnicas estadísticas que permitan extrapolar y completar los datos faltantes, por inferencia, sería otra alternativa a seguir.

En resumen, en esta investigación se destaca la importancia del estudio del TEC y de la rotación de Faraday como indicadores clave para comprender la dinámica de la ionosfera y su relación con la actividad solar. Además, resalta la necesidad de continuar recopilando datos detallados

y completos para mejorar la precisión de los modelos y las correcciones aplicadas en las señales de radio. Estos estudios se realizan por primera vez en Ecuador y su valor se centra en el conocimiento y caracterización de la ionósfera local para aplicaciones prácticas de uso de las señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para posicionamiento, navegación y para mejora de las comunicaciones satelitales en la región.

Referencias bibliográficas

- [1] J.-M. Noël A. C. Cushley and K. Kabin. Faraday rotation, total electron content, and their sensitivity to the average parallel component of the magnetic field. *Radio Science*, 53, 1075–1088., 2018.
- [2] Y. L. Alpert. *Radio wave propagation and the ionosphere*. Consultants Bureau New York, 1963.
- [3] et al. C. P. Vega, A. C. López. Sistemas de telecomunicación, volumen 7. *Ed. Universidad de Cantabria*, 2007.
- [4] A. Kleusberg G. Lachapelle-R. Langley K. Schwarz J. Tranquilla P. Vanicek D. Wells, N. Beck and D. Delikaraoglou. *Guide to gps positioning*. Canadian GPS Assoc. Citeseer, 1987.
- [5] K. Davies. Ionospheric radio. 1990. *Number 31. IET*, 1990.
- [6] C. D. Beggan-P. Alken J. Aubert O. Barrois F. Bertrand T. Bondar A. Boness L. Brocco E. Thébault, C. C. Finlay. International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 2015.
- [7] E. D. Lopez Izurieta E. Toapanta Guamanarca, j. H. Barbier. Ionospheric total electron content (tec) above ecuador. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022.
- [8] Mauricio A. Gende. Mapas ionosféricos derivados de observaciones gps para aplicaciones geodésicas e investigaciones geofísicas. *Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas*, 2002.

- [9] A. Green. Early history of the ionosphere. *journal of atmospheric and terrestrial physics*. London, UK: Cambridge University Press., 1974.
- [10] M. P. M. (Martin P. M.) Hall. *Radiowave propagation*. P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1989.
- [11] David Hathaway. The solar cycle. *Living Rev. Sol. Phys.*, 39:227, 09 2015.
- [12] J.M. Juan Zornoza J. Sanz Subirana and M. Hernández-Pajares. *Ionospheric Delay*. Technical University of Catalonia, Spain., 2011.
- [13] M. Hernández-Pajares J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and R. Orús. *Second-order ionospheric term in gps: Implementation and impact on geodetic estimates*. *Journal of geophysical research: solid earth*, 112(B8), 2007.
- [14] H. K. Jhuang, T. C. Tsai, L. C. Lee, and Y. Y. Ho. Ionospheric tidal waves observed from global ionosphere maps: Analysis of total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018.
- [15] Elliott D Kaplan and Christopher Hegarty. *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. Artech house, 2017.
- [16] Michael C. Kelley. *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics Electrodynamics*. Elsevier, 2009.
- [17] A. Komjathy. Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System. 2023.
- [18] I. Krinberg and A. Tashchilin. ionosphere and plasmasphere. i. 1984.
- [19] L. F. McNamara. The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding. *Krieger Publishing Company*, 1991.
- [20] M. Mendillo. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*, 44(4), 2006.
- [21] M. Abdullah N. Ya'acob and M. Ismail. A new technique for mapping of total electron content using gps network in japan. *Earth, planets and space*, 54(1):63–70, 2002.

- [22] M. Abdullah N. Ya'acob and M. Ismail. Gps total electron content (tec) prediction at ionosphere layer over the equatorial region. *In Trends in Telecommunications Technologies. IntechOpen*, 2010.
- [23] International Journal of Advanced Computer Science and 7(12):1–6 Applications. Estimation method of ionospheric tec distribution using single frequency measurements of gps signals. 2016.
- [24] R. Scharroo and W. H. F. Smith. A global positioning system–based climatology for the total electron content in the ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10), 2010.
- [25] R. Creiger J. Freeman Jr R. Wolf R. Spiro R. V. Hilmer J. Shade T. Tascione, H. Kroehl and B. Hausman. *New ionospheric and magnetospheric specification models*. Radio Science, 1988.
- [26] E. G. Toapanta. Estimación del campo geomagnético ecuatorial a través del estudio del contenido total de electrones de la ionósfera. *Escuela Politécnica Nacional*, 2021.
- [27] Iain Webster et al. A regional model for the prediction of ionospheric delay for single frequency users of the global positioning system. 2023.