

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO



ANÁLISIS DE PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS
ESPORÁDICAS A PARTIR DE MEDICIONES GNSS DE
ALTA FRECUENCIA

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA:

CHARBETH LÓPEZ URIAS

DIRECTORES:

DR. GUADALUPE ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA

DRA. REBECA LÓPEZ MONTES

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO ENERO DEL 2025

Agradecimientos

A lo largo de las distintas etapas de la vida, experimentamos esa innata necesidad de establecer conexiones que nos impulsen a avanzar y evolucionar como individuos. En este sentido, mi profundo agradecimiento se dirige hacia mis padres y mi hermano, cuyo respaldo incondicional ha sido fundamental.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra, mi asesor, por brindarme la oportunidad de ser su estudiante. Su paciencia, apoyo y valiosas enseñanzas han sido pilares cruciales en mi formación académica, y por ello, le estoy profundamente agradecido.

Asimismo, agradezco a la Dra. Rebeca López Montes por su dedicación y el tiempo que generosamente ha destinado a aconsejarme. Su apoyo ha sido invaluable en mi trayectoria.

Quiero reconocer al Dr. Armando Carrillo Vargas por compartir generosamente sus vastos conocimientos. Agradezco su disposición para aceptarme como su alumno de movilidad, así como su constante apoyo y paciencia durante este proceso de aprendizaje.

Agradezco también a mis distinguidos profesores de posgrado por sus excelentes enseñanzas y la atención brindada durante mis

estudios. Sus contribuciones han dejado una marca significativa en mi desarrollo académico.

De igual forma, agradezco al Dr. Enrique Cabral Cano por su apoyo al proveer los insumos de datos necesarios para el desarrollo de mi trabajo doctoral, sin el cual este trabajo no habría sido posible.

Quisiera expresar mi gratitud al Posgrado en Ciencias de la Información por aceptarme y respaldarme a lo largo de mi estadía. Su apoyo ha sido fundamental en mi experiencia académica.

Finalmente, deseo extender mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó para mi manutención durante mi estancia de posgrado. Su generoso respaldo ha sido crucial para mi desarrollo académico, y por ello, les estoy profundamente agradecido.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte esencial de mi camino académico y personal.

Resumen

La influencia de la actividad solar en la ionosfera, crucial en la relación Sol-Tierra, ha sido ampliamente estudiada, reconociéndose que los eventos solares pueden inducir alteraciones en la ionosfera y el campo geomagnético. Esta investigación analiza perturbaciones ionosféricas esporádicas provocadas por ráfagas solares de clase X entre 2021 y 2022, que suelen pasar desapercibidas con metodologías convencionales. Se desarrolló una nueva metodología para identificar estas perturbaciones, utilizando datos de Contenido Total de Electrones (TEC, por sus siglas en inglés) a intervalos de 5 Hz, analizados con algoritmos de ondeletas. El estudio abarcó seis eventos con intensidades entre X1.0 y X1.5, utilizando datos de estaciones de la Red GNSS de la UNAM. Los resultados mostraron alteraciones en la ionosfera durante las ráfagas solares, con un aumento en los coeficientes de detalle en los Niveles 7 y 8, consistente en todos los satélites observados y estaciones distribuidas en México. Aunque dos de los eventos ocurrieron en el limbo solar, las alteraciones fueron similares a las de los eventos originados en el centro del disco solar. Esto sugiere que, con una metodología detallada y de alta frecuencia, es posible detectar perturbaciones ionosféricas sin importar la ubicación de la ráfaga en el disco solar, siempre que esté en la cara visible del Sol.

Abstract

The influence of solar activity on the ionosphere, crucial in the Sun-Earth relationship, has been widely studied, with recognition that solar events can induce disturbances in the ionosphere and the geomagnetic field. This research analyzes sporadic ionospheric disturbances caused by X-class solar flares between 2021 and 2022, which are often overlooked by conventional methodologies. A new methodology was developed to identify these disturbances, using Total Electron Content (TEC) data at 5 Hz intervals, analyzed with wavelet algorithms. The study covered six events with intensities between X1.0 and X1.5, using data from GNSS stations of the UNAM Network. The results showed ionospheric disturbances during solar flares, with an increase in the detail coefficients at Levels 7 and 8, consistent across all observed satellites and stations distributed throughout Mexico. Although two of the events occurred at the solar limb, the disturbances were similar to those of events originating from the center of the solar disk. This suggests that, with a detailed and high-frequency methodology, it is possible to detect ionospheric disturbances regardless of the flare's position on the solar disk, as long as it is on the Sun's visible face.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Hipótesis	6
1.3. Justificación	7
1.4. Objetivos	8
1.5. Antecedentes	9
2. Marco Teórico	15
2.1. Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) .	15
2.1.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)	17
2.1.2. Señales GPS	18
2.2. Ionosfera	19
2.2.1. Estructura ionosférica	20

2.2.2.	Procesos físicos y químicos en la ionosfera	23
2.2.3.	Eventos que perturban la ionosfera	25
2.3.	Contenido Total de Electrones (TEC)	30
2.4.	Wavelets (Ondeletas)	35
3.	Materiales y métodos	39
3.1.	Datos Utilizados	39
3.2.	Metodología	42
3.2.1.	Monitoreo de Ráfagas Solares	43
3.2.2.	Análisis del Comportamiento del Campo Magnético	44
3.2.3.	Cálculo del TEC	45
3.2.4.	Análisis de Ondeletas	49
4.	Resultados y Análisis	54
4.1.	Eventos	54
4.1.1.	3 Julio del 2021	58
4.1.2.	28 Octubre del 2021	67
4.1.3.	30 Marzo del 2022	72
4.1.4.	30 Abril del 2022	79
4.1.5.	10 Mayo del 2022	86
4.1.6.	2 Octubre del 2022	93
5.	Síntesis y Conclusiones	98
5.1.	Síntesis	98
5.2.	Conclusiones	101
	Bibliografía	105

Índice de figuras

2.1. TEC inclinado (sTEC) desde un satélite a un receptor.	33
2.2. Vertical TEC (vTEC).	34
2.3. Diagrama de bloques del banco de filtros de análisis de la DWT (Colom et al., 2001).	38
3.1. Mapa de distribución de las estaciones GNSS de la Red del Instituto de Geofísica de la UNAM.	40
3.2. Corrección de TEC-pseudorange al TEC-fase.	47
3.3. Resultados del programa para el satélite PRN 2	49
3.4. Distribución de resultados de la transformada wavelet, iniciando desde el Nivel 1 hasta el Nivel 3.	51
3.5. Distribución de resultados de la transformada wavelet, iniciando desde el Nivel 6 hasta el Nivel 8.	52
4.1. Localización de la ráfaga en el disco solar.	56
4.2. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 3 de julio del 2021.	60
4.3. Evento 184 con la estación UTEO, para los satélites 14, 17, 19, 28 y 30, respectivamente.	61
4.4. Evento 184 con la estación UNPM, para los satélites 13, 17, 19 y 30, respectivamente.	62
4.5. Evento 184 con la estación OXUM, para los satélites 7, 13, 14, 17, 19, 28 y 30, respectivamente.	63

4.6. Evento 184 con la estación SPIG, para los satélites 13, 14, 15, 17, 19 y 28, respectivamente.	64
4.7. Evento 184 con la estación SSNX, para los satélites 14, 17, 19, 28 y 30, respectivamente.	65
4.8. Evento 184 con la estación UCOE, para los satélites 14, 17, 19, 28 y 30, respectivamente.	66
4.9. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 28 de octubre del 2021.	68
4.10. Evento 301 con la estación UNPM, para los satélites 10, 18, 23 y 24, respectivamente.	69
4.11. Evento 301 con la estación SPIG, para el satélite 23.	70
4.12. Evento 301 con la estación UCOE, para los satélites 10, 18, 23 y 24, respectivamente.	71
4.13. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 30 de marzo del 2022.	73
4.14. Evento 89 con la estación UNPM, para los satélites 7, 14 y 30, respectivamente.	74
4.15. Evento 89 con la estación OXUM, para los satélites 1, 7, 14 y 30, respectivamente.	75
4.16. Evento 89 con la estación SPIG, para los satélites 7, 14 y 30, respectivamente.	76
4.17. Evento 89 con la estación SSNX, para los satélites 1, 7, 14 y 30, respectivamente.	77
4.18. Evento 89 con la estación UCOE, para los satélites 1, 7, 14 y 30, respectivamente.	78
4.19. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 30 de abril del 2022.	80
4.20. Evento 120 con la estación UNPM, para los satélites 4, 7, 8 y 9, respectivamente.	81
4.21. Evento 120 con la estación OXUM, para los satélites 4, 7, 8 y 9, respectivamente.	82

4.22. Evento 120 con la estación SPIG, para los satélites 7, 8, 9 y 30, respectivamente.	83
4.23. Evento 120 con la estación SSNX, para los satélites 7, 8 y 9, respectivamente.	84
4.24. Evento 120 con la estación UCOE, para los satélites 4, 7, 8 y 9, respectivamente.	85
4.25. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 10 de mayo del 2022. 87	
4.26. Evento 130 con la estación UNPM, para los satélites 7, 8 y 9, respectivamente.	88
4.27. Evento 130 con la estación OXUM, para los satélites 8, 9 y 21, respectivamente.	89
4.28. Evento 130 con la estación SPIG, para los satélites 7, 8, 14 y 30, respectivamente.	90
4.29. Evento 130 con la estación SSNX, para los satélites 7, 8, 9 y 14, respectivamente.	91
4.30. Evento 130 con la estación UCOE, para los satélites 7, 8 y 9, respectivamente.	92
4.31. Resultados de wavelets para todos los PRN de todas las estaciones, del evento del día 2 de octubre del 2022. 94	
4.32. Evento 275 con la estación UTEO, para los satélites 10, 22 y 32, respectivamente.	95
4.33. Evento 275 con la estación SSNX, para los satélites 10, 22 y 32, respectivamente.	96
4.34. Evento 275 con la estación SSNX, para los satélites 10, 22 y 32, respectivamente.	97

Índice de tablas

2.1.	Descripción de la señal GPS	19
2.2.	Clasificación de las Tormentas Geomagnéticas según su grado de perturbación sobre la ionosfera González et al. (1999).	28
2.3.	Clasificación de las ráfagas solares en función de su intensidad, siguiendo el esquema establecido por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), que las categoriza en los tipos A, B, C, M y X, (Hospodka y Matějovie, 2022).	29
3.1.	Coordenadas de las estaciones GNSS utilizadas, del Instituto de Geofísica de la UNAM.	41
4.1.	Características de los eventos	57

Capítulo 1

Introducción

La ionosfera terrestre es la región de la atmósfera superior que está continuamente ionizada, principalmente debido a la influencia de la radiación solar. Esta ionización da lugar a una capa que se extiende desde aproximadamente 60 km hasta 1000 km, por encima de la superficie de la Tierra (Budden, 1988). La ionosfera desempeña un papel crucial en muchos procesos geofísicos, y es fundamental para la funcionalidad de los sistemas de comunicación y navegación.

Uno de los principales desafíos en el campo de los sistemas de posicionamiento basados en satélites, es el impacto de la ionosfera en la integridad de las señales que se generan en el satélite y se transmiten al receptor. La ionosfera introduce errores en el posicionamiento al afectar las señales de los satélites, tanto en amplitud, como en fase. Esta interferencia se debe a los canales de trayectorias múltiples no homogéneos y dispersivos de la ionosfera, que exhiben una considerable variabilidad espacial y temporal (Turel y Arikan, 2010). Estas variaciones pueden conducir a inexactitudes en los datos de posicionamiento, lo cual, es particularmente problemático para aplicaciones que requieren alta precisión. La naturaleza dispersiva de la ionosfera significa que sus efectos en las señales pueden ser modelados y estudiados. El efecto dispersivo es directamente proporcional

al Contenido Total de Electrones (TEC) e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal (Sardon et al., 1993). Al comprender estas relaciones, los investigadores pueden desarrollar métodos para corregir los errores ionosféricos, mejorando la precisión de los sistemas de posicionamiento.

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) se han convertido en herramientas esenciales para la comunidad geodésica y otros campos que requieren posicionamiento preciso. Estos sistemas, que incluyen GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, proporcionan cobertura global y pueden alcanzar una precisión a nivel de milímetros bajo condiciones óptimas. Sin embargo, la precisión de los GNSS se ve comprometida por varias fuentes de error, siendo la interferencia ionosférica una de las más significativas. Durante periodos de fuerte scintilación ionosférica, este tipo de interferencia puede aumentar el error hasta 3 veces más en comparación con días tranquilos, afectando notablemente la exactitud del posicionamiento (Alves et al., 2020). Para abordar el problema de los errores ionosféricos, los sistemas GNSS modernos han incorporado nuevas señales y frecuencias. Estos avances no sólo mejoran la precisión del posicionamiento, sino que también, ofrecen nuevas oportunidades para la investigación científica de la ionosfera. La capacidad de estudiar el comportamiento ionosférico utilizando datos GNSS se ha convertido en una herramienta valiosa para los científicos, permitiendo la monitorización y el análisis continuo de esta dinámica región de la atmósfera.

Una de las técnicas más efectivas para evaluar el estado de la ionosfera es el cálculo del TEC utilizando dispositivos GNSS. Este enfoque es favorecido debido a la fiabilidad y disponibilidad de bases de datos de acceso libre y en tiempo real, lo que lo hace accesible para investigadores en todo el mundo (Rodger y Jarvis, 2000). El uso de mediciones de TEC a partir de datos GNSS se ha convertido en un pilar en el estudio del clima espacial, que abarca fenómenos que ocu-

rran en el espacio exterior cerca de la Tierra o dentro de la atmósfera superior terrestre. El estudio del TEC proporciona información sobre varios fenómenos ionosféricos, incluyendo variaciones diurnas, cambios estacionales, respuestas a la actividad solar y geomagnética. Estos estudios, son esenciales para comprender el impacto de la ionosfera en los sistemas de comunicación y navegación, así como para avanzar en nuestro conocimiento del clima espacial y sus efectos en el entorno terrestre.

La ionosfera está sujeta a una variedad de perturbaciones, que pueden afectar su estructura y comportamiento. Esta investigación se centra en perturbaciones esporádicas, que se analizan a través de datos GNSS de alta frecuencia. Estas perturbaciones están a menudo asociadas con tormentas geomagnéticas, meteoros y actividad solar, lo que lleva a incrementos irregulares, marcadamente abruptos y rápidamente variables en la densidad de electrones dentro de la capa E de la ionosfera. Estas perturbaciones pueden ocurrir tanto durante el día como durante la noche, y su intensidad y frecuencia pueden variar significativamente con la latitud. Durante tales eventos, la capa E esporádica puede reflejar ondas de mayor frecuencia que típicamente no son detectadas, permitiendo la comunicación de larga distancia, que de otro modo sería imposible (Corbacho, 2018). La causa principal de estas anomalías en latitudes medias es la variación del viento con la altitud. La interacción entre los vientos atmosféricos y el campo magnético terrestre comprime la ionización, lo que lleva a la formación de estas capas esporádicas (Hargreaves, 1992). Comprender estos procesos es crucial para mejorar la precisión de los sistemas basados en GNSS y avanzar en nuestro conocimiento de la dinámica ionosférica. Al estudiar de manera exhaustiva estas perturbaciones y sus causas subyacentes, los investigadores pueden desarrollar mejores modelos para predecir el comportamiento ionosférico, mitigar sus efectos adversos en los sistemas de comunicación y navegación, y mejorar la fiabilidad general de las tecnologías basadas en satélites.

Esta introducción proporciona una visión de la ionosfera, su impacto en los sistemas de posicionamiento y la importancia del GNSS en la investigación ionosférica. También destaca la importancia de estudiar las perturbaciones ionosféricas y sus implicaciones tanto para la investigación científica como para las aplicaciones prácticas, estableciendo el contexto para los estudios y análisis detallados presentados en los capítulos posteriores de esta tesis.

1.1. Planteamiento del problema

La actividad solar en la ionosfera ha sido analizada de diversas maneras en múltiples estudios, ya que es importante el monitoreo y seguimiento de la relación Sol-Tierra. Existen eventos solares capaces de provocar alteraciones en el campo geomagnético y la ionosfera, que a su vez podrían provocar daños en estaciones eléctricas de alta tensión, fallas en las órbitas de los satélites o daños en sus componentes, entre otras cosas.

Un parámetro distintivo que contiene inherentemente la variabilidad de la ionosfera es el TEC, que se define como la integral de línea de densidad electrónica a lo largo de una trayectoria de rayos o como medida del número total de electrones a lo largo de una ruta de la onda de radio (Budden, 1988; Hargreaves, 1995).

Los sistemas cuentan con diversas señales a diferentes frecuencias, lo cual nos permite verificar el efecto de la ionosfera en las señales. De esta manera, se puede medir el grado de ionización a lo largo de la línea de visión del satélite al receptor. En el caso específico del GPS, que opera en dos frecuencias diferentes al mismo tiempo (L1 y L2), es posible medir el retraso de fase relativo entre las dos señales, con lo que se determina el TEC (Eftaxiadis et al., 1999). Por lo tanto, analizar el TEC durante eventos ionosféricos es una confiable técnica para analizar el estado de la ionosfera.

Los eventos esporádicos mantienen perturbada la ionosfera durante minutos y en algunos casos hasta horas, sin embargo, estos eventos son los que tienen duraciones más pequeñas, por lo tanto, para tener mayor detalle al estudiar estos eventos es necesario obtener datos a intervalos de muestreo de milisegundos. Actualmente los instrumentos GNSS permiten tener mediciones a estos intervalos, abriendo una gran posibilidad de estudiar a detalle los eventos ionosféricos.

1.2. Hipótesis

La ionosfera desempeña un papel importante en el clima espacial. Al analizar eventos ionosféricos esporádicos utilizando mediciones GNSS de alta frecuencia, es posible identificar características que podrían no ser detectables con intervalos de muestreo más largos. Esto permitirá verificar y analizar con mayor detalle el evento en cuestión y sus implicaciones en nuestro entorno.

1.3. Justificación

Es de suma importancia estudiar el clima espacial, por los efectos que puede llegar a tener en nuestro planeta, las alteraciones en la ionosfera reflejan en gran medida la actividad solar. Existen eventos intensos que provocan fallos graves en las telecomunicaciones o incluso dejar de funcionar, fallas en órbitas de los satélites, errores en la navegación, así como también podría provocar daños en centrales eléctricas, que a su vez, podría poner en riesgo vidas humanas.

Actualmente, todos los estudios realizados, que utilizan GNSS para estudiar la ionosfera tienen limitaciones de muestreo, los programas utilizados para el cálculo del TEC tienen intervalos de tiempo altos considerando que actualmente los receptores geodésicos GNSS son capaces de medir incluso hasta 100 Hz. Partiendo de esto, es necesario generar programas con intervalos de muestreo similares a los receptores geodésicos. Esto permitirá estudiar con mayor detalle las perturbaciones esporádicas. Al tener mejor resolución, existe la posibilidad de observar información adicional relevante que se pierde en los tiempos de muestreo tradicionales. Es importante estudiar estos eventos por el impacto que pueden tener en nuestras tecnologías, siendo necesario desarrollar una metodología precisa, que nos permita analizar los eventos, teniendo la posibilidad de identificar otro tipo de perturbaciones esporádicas de muy corta duración (segundo o milisegundos) que pueden ser de origen terrestre y que probablemente no se estén observando.

1.4. Objetivos

Objetivo general:

-Desarrollar una nueva metodología que permita analizar la ionosfera durante eventos esporádicos, como perturbaciones provocadas por la actividad solar, utilizando mediciones GNSS de alta frecuencia.

Objetivos particulares:

-Identificar los factores que influyen en la relación entre el TEC y las perturbaciones ionosféricas esporádicas provocadas por ráfagas solares de clase X, analizadas a altas frecuencias de muestreo.

-Desarrollar una metodología para validar que las variaciones del TEC a altas frecuencias son de origen ionosférico.

-Desarrollar un programa capaz de calcular el TEC al mismo intervalo de medición de los receptores GNSS.

-Analizar perturbaciones esporádicas a intervalos de muestreo de subsegundos.

-Desarrollar una metodología para probar la precisión del cálculo del TEC a intervalos de tiempo pequeños.

1.5. Antecedentes

Los experimentos innovadores de Guillermo Marconi en la transmisión de radio remodelaron nuestra comprensión de la propagación de ondas electromagnéticas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El 14 de mayo de 1870, Marconi realizó la primera transmisión de radio, un momento crucial que mostró el fenómeno notable de las ondas de radio siendo reflejadas alrededor de la superficie de la Tierra a grandes distancias. Esta demostración sentó las bases para avances posteriores en la tecnología de comunicación inalámbrica .

Uno de los logros más destacados de Marconi ocurrió en 1901, cuando logró con éxito, la primera comunicación transatlántica. Cubriendo una distancia de 3000 kilómetros entre Gales y Terranova, este hito histórico demostró la viabilidad de la comunicación de radio a larga distancia. Sin embargo, los logros de Marconi plantearon un rompecabezas para los científicos de la época, especialmente a la luz de la confirmación experimental de Heinrich Hertz de que las ondas electromagnéticas se comportaban de manera similar a la luz, propagándose en trayectorias rectas. Según la comprensión convencional, la curvatura de la Tierra debería haber obstaculizado la visibilidad directa, lo que planteaba preguntas sobre cómo las señales de Marconi atravesaban distancias tan vastas. En 1902, los experimentos de Marconi arrojaron más información sobre las peculiaridades de la propagación de ondas de radio. Observó discrepancias significativas en el rendimiento de la comunicación entre el día y la noche. Mientras que las transmisiones diurnas encontraban limitaciones más allá de distancias de 1000 kilómetros, las recepciones nocturnas resultaban posibles a distancias superiores a 3000 kilómetros. Este fenómeno desconcertó a los científicos hasta que Arthur Kennelly y Oliver Heaviside proporcionaron una explicación innovadora más tarde ese año. Postularon la existencia de una capa ionizada en la atmósfera superior, ahora conocida como ionosfera, que era capaz

de reflejar ondas de radio a largas distancias. Este descubrimiento revolucionó nuestra comprensión de la comunicación a larga distancia, y sentó las bases para la exploración del papel de la ionosfera en la propagación de ondas de radio. El trabajo pionero de Marconi no sólo impulsó el desarrollo de la comunicación inalámbrica, sino que también, allanó el camino para una mayor investigación científica sobre la atmósfera superior de la Tierra y su interacción con las ondas electromagnéticas (Palacios, 2010).

Antes del advenimiento de los GNSS, los estudios ionosféricos dependían principalmente de técnicas de medición terrestre. Estos métodos incluían ionosondas y radares terrestres, que emitían ondas de radio y analizaban sus reflexiones en la ionosfera para inferir sus propiedades. El sondeo basado en la rotación de Faraday implicaba medir la rotación de ondas de radio polarizadas mientras pasaban a través de la ionosfera, proporcionando información sobre las variaciones de densidad electrónica. Las observaciones del efecto Doppler seguían cambios de frecuencia en las señales de radio transmitidas a través de la ionosfera, ofreciendo datos valiosos sobre la dinámica ionosférica. Además, los sistemas de seguimiento de doble frecuencia de microondas, monitoreaban las diferencias de fase entre señales de doble frecuencia para estimar perfiles de densidad electrónica en la ionosfera. Sin embargo, la introducción de la tecnología GNSS marcó un hito significativo en la investigación ionosférica. Los sistemas GNSS, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Galileo y GLONASS, consisten en constelaciones de satélites orbitando la Tierra. Estos satélites emiten señales que son recibidas por receptores terrestres. Estas señales atraviesan la ionosfera, experimentando retrasos y cambios de fase debido a variaciones en la densidad electrónica, antes de llegar a los receptores. Al analizar estos efectos, los investigadores pueden derivar información valiosa sobre la estructura y el comportamiento de la ionosfera.

Aunque los GNSS fueron diseñados inicialmente para fines de navegación y posicionamiento, su capacidad no prevista para estudiar la ionosfera ha abierto nuevas vías para la investigación ionosférica. Esta oportunidad inesperada se debe al hecho de que las señales GNSS atraviesan la ionosfera en su camino desde los satélites hasta los receptores terrestres, experimentando retrasos y cambios de fase debido a las variaciones de densidad electrónica en esta región. A pesar de no haber sido desarrollados específicamente para estudiar la ionosfera, los sistemas GNSS han surgido como herramientas valiosas para investigar esta región de la atmósfera terrestre. La viabilidad y confiabilidad de estudiar la ionosfera utilizando señales GNSS han llevado a un aumento significativo de la investigación en este campo. Este aumento de interés está impulsado por el papel crítico de la ionosfera en diversas aplicaciones, especialmente en comunicaciones y navegación. Comprender el comportamiento de la ionosfera es esencial para mejorar la precisión y confiabilidad de los sistemas de posicionamiento basados en GNSS y mitigar los efectos de las perturbaciones ionosféricas en la propagación de señales. Los estudios ionosféricos están estrechamente entrelazados con los fenómenos que ocurren entre el Sol y la Tierra. Los investigadores utilizan datos GNSS para realizar tomografía ionosférica o mapeo 3D, lo que permite la visualización de parámetros como el TEC. Estas técnicas proporcionan información valiosa sobre las variaciones espaciales y temporales de la densidad electrónica en la ionosfera, ayudando en la caracterización de su estructura y dinámica (Rao et al., 2019; Nykiel et al., 2019; Krypiak-Gregorczyk, 2019).

También, hay una amplia variedad de estudios sobre la ionosfera durante tormentas geomagnéticas (Yeeram, 2019; Dugassa et al., 2019; Qian et al., 2019). Eventos esporádicos, como anomalías de la capa E esporádica, también han sido analizados en años recientes (Ogawa et al., 2009; Arras y Wickert, 2018). Además, los investigadores han analizado la respuesta ionosférica durante períodos de intensa actividad solar, como ráfagas solares, eyecciones de masa coronal y corrotantes emergiendo de hoyos coronales solares, que pueden perturbar la ionosfera y afectar la propagación de señales GNSS y sistemas de comunicación. Comprender la respuesta ionosférica a la actividad solar, mejora las capacidades de pronóstico del clima espacial. Además, los estudios ionosféricos se extienden a investigar el comportamiento de la ionosfera durante tormentas geomagnéticas, que son perturbaciones en el campo magnético terrestre causadas por interacciones con el viento solar. Estas tormentas pueden inducir perturbaciones ionosféricas, afectando la propagación de señales GNSS y sistemas de comunicación. Además, los investigadores han dirigido su atención a eventos esporádicos en la ionosfera, como anomalías de la capa E esporádica. Estos fenómenos, que fueron descritos por primera vez a principios de la década de 1930, están vinculados a tormentas magnéticas y eléctricas, que pueden tener implicaciones significativas para los sistemas de comunicación y navegación. También se han realizado estudios sísmicos utilizando señales GNSS para buscar precursores de eventos sísmicos (Sharma et al., 2017; Cahyadi et al., 2018; Tariq et al., 2019; Nayak et al., 2023a,b). Estos estudios exhaustivos proporcionan información valiosa sobre los desafíos, avances y futuras direcciones en la investigación ionosférica, enfatizando el papel crítico de la calidad de los datos, la modelización y la integración con otras fuentes de datos para una comprensión integral de las perturbaciones ionosféricas.

En paralelo, con la comprensión de los fenómenos ionosféricos, los investigadores han explorado diversos enfoques analíticos para

estudiar las perturbaciones ionosféricas. Zhang et al. (2020) centran su investigación en el análisis de ondículas para identificar y caracterizar las perturbaciones ionosféricas, destacando su importancia en la comprensión del comportamiento dinámico de la ionosfera. Li et al. (2019) enfatizan la importancia de las técnicas de análisis espectral para discernir las perturbaciones ionosféricas, demostrando su utilidad en la descomposición de las señales GNSS para una identificación precisa de anomalías. Wang et al. (2019) profundizan en el análisis en el dominio de la frecuencia, proporcionando una visión integral de las características espectrales de las perturbaciones ionosféricas y sus implicaciones para la propagación de señales. Han et al. (2021) y Wang et al. (2020) exploran enfoques basados en aprendizaje automático, mostrando el potencial de la inteligencia artificial en la detección y clasificación automática de perturbaciones ionosféricas, ofreciendo vías para el monitoreo en tiempo real. Además, Niknam y Simpson (2021) revisaron técnicas de modelado para la propagación de ondas electromagnéticas que involucran la ionosfera. Shimna y Vijayan (2020) destacan los beneficios de integrar múltiples técnicas de análisis para mejorar la detección y caracterización de perturbaciones ionosféricas, aprovechando sus fortalezas complementarias. De manera similar, Li et al. (2018) demuestran los efectos sinérgicos de integrar diversas técnicas de análisis, presentando un enfoque integral para comprender y mitigar los impactos de las perturbaciones ionosféricas. Pappoe et al. (2023) y Li et al. (2018), subrayan la importancia de un enfoque multifacético, combinando métodos de análisis complementarios para lograr una comprensión más profunda del comportamiento ionosférico. Finalmente, Baumgarten et al. (2021) discuten la navegación y caracterización ionosférica utilizando señales de alta frecuencia, mientras que He et al. (2023) destacan el valor de combinar diferentes métodos de análisis para mejorar la precisión y confiabilidad de la detección y caracterización de las perturbaciones ionosféricas, mostrando los beneficios de un enfoque variado. En conjunto, estos estudios

proporcionan conocimientos valiosos sobre los desafíos, avances y futuras direcciones en el análisis de perturbaciones ionosféricas, enfatizando el papel crítico de la calidad de los datos, el modelado y la integración con otras fuentes de datos para un estudio integral de las perturbaciones ionosféricas.

La evolución de la investigación ionosférica, desde los experimentos innovadores de Marconi hasta los estudios contemporáneos basados en GNSS, resalta la búsqueda continua para desentrañar las complejidades de la atmósfera superior de la Tierra y sus implicaciones para la comunicación, la navegación y la exploración científica. Los sistemas GNSS han revolucionado la investigación ionosférica, brindando a los investigadores oportunidades sin precedentes para estudiar esta región crítica de la atmósfera terrestre. Al aprovechar los datos GNSS, los científicos pueden avanzar en nuestra comprensión de la dinámica ionosférica y mejorar la confiabilidad de las tecnologías basadas en GNSS en diversas aplicaciones.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS)

Los GNSS, como el GPS de EE. UU., GLONASS de Rusia, Galileo de la Unión Europea (UE) y Beidou de China (también llamado COMPASS), junto con otros sistemas de navegación por satélite regionales, constituyen un conjunto de sistemas altamente precisos y continuos. Cada satélite GNSS emite señales de radio en dos o más frecuencias en banda L (1-2 GHz) con una longitud de onda de aproximadamente 0.20 m, y estas señales son utilizadas para la navegación, el posicionamiento y la sincronización. Además, las señales refractadas de los satélites GNSS, combinadas con las observaciones GNSS en tierra, permiten obtener datos detallados sobre el vapor de agua troposférico, la temperatura y la presión, los parámetros de la tropopausa, el contenido de electrones totales ionosféricos (TEC) y el perfil de densidad electrónica (Jin et al., 2014). Estos sistemas de posicionamiento global, permiten determinar con gran precisión las coordenadas geográficas y el tiempo en cualquier lugar del mundo, con una cobertura continua durante las 24 horas y en diversas con-

diciones climáticas, gracias a la elección de frecuencias de señal resistentes a interferencias climáticas. El diseño de los sistemas GNSS considera aspectos como la órbita, la potencia de señal y la altura de los satélites, lo que permite alcanzar una cobertura global con una cantidad adecuada de satélites en órbita media alrededor de la Tierra (a una altura de aproximadamente 21,000 km, se necesitarían al menos 21 satélites para una cobertura mundial) (Bravo, 2020).

El sistema GNSS se divide en tres segmentos principales que trabajan en conjunto para proporcionar servicios de posicionamiento y navegación global. Estos segmentos son:

Segmento Espacial: El segmento espacial está compuesto por la constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra. Cada uno de los sistemas GNSS tiene su propia constelación de satélites. Estos satélites están distribuidos estratégicamente en diferentes órbitas para asegurar una cobertura global y continua. Transmiten señales de radio precisas que contienen información sobre su posición y el tiempo sincronizado (Groves, 2015). El segmento espacial es esencial para que los receptores en la Tierra puedan calcular su ubicación mediante el trilateración, que consiste en medir la distancia a varios satélites y determinar la posición de forma precisa.

Segmento de Control: El segmento de control se compone de estaciones terrestres ubicadas en diferentes lugares alrededor del mundo. Estas estaciones monitorean y controlan los satélites en órbita. Son responsables de ajustar las órbitas de los satélites, enviar actualizaciones de tiempo y correcciones de errores a las señales de navegación, y asegurar el buen funcionamiento del sistema GNSS en general (Ashby, 2002). La precisión y la confiabilidad del sistema GNSS dependen en gran medida de la efectividad del segmento de control.

Segmento del Usuario: El segmento del usuario está compuesto por los receptores GNSS que utilizan las señales transmitidas por los satélites para calcular su propia posición y proporcionar servicios de navegación a los usuarios. Estos receptores se encuentran en una amplia variedad de dispositivos, como teléfonos inteligentes, navegadores de automóviles, relojes deportivos y sistemas de navegación aérea. Los receptores del usuario interpretan las señales recibidas y calculan su posición, velocidad y tiempo con alta precisión (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). Además de la navegación, el segmento del usuario también permite una variedad de aplicaciones, como el rastreo de flotas, el mapeo geodésico, la agricultura de precisión, entre otros.

En conjunto, estos tres segmentos trabajan de manera sincronizada para ofrecer un sistema de posicionamiento y navegación global preciso y confiable, que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en la vida cotidiana y en diversas industrias a nivel mundial.

2.1.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)

El GPS es el primer sistema de navegación por satélite en entrar en funcionamiento, el desarrollo del sistema inició en 1973 mediante la integración de diversos programas anteriores. El primer satélite prototipo operativo fue lanzado en 1978, seguido por la declaración de la capacidad operativa inicial a fines de 1993. Finalmente, la capacidad operativa plena se logró a fines de 1994 (Groves, 2015), es operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, actualmente es accesible por cualquier usuario (Sánchez Durán, 2018). Está compuesto por 24 satélites con una órbita de 26560 Km. de radio y un periodo de 12 horas, cada plano orbital contiene un mínimo de cuatro satélites. Sin embargo, estos

satélites no están dispuestos de manera uniforme; dos de ellos están separados por aproximadamente 30° en cada plano, mientras que los otros dos están separados entre 92° y 137° , asegurando así que el plano contenga al menos los cuatro satélites requeridos (Groves, 2015), el segmento de control consta de cinco estaciones, de monitoreo encargadas de mantener y supervisar el correcto funcionamiento de los satélites, y el segmento usuario, que está formado por los receptores situados en tierra (Pozo-Ruz et al., 2000).

2.1.2. Señales GPS

Los satélites del GPS transmiten su información en varias señales (Tabla 2.1), las principales son la L1 y L2, además, de un mensaje de navegación asociados con el código de Adquisición Aproximativa (C/A) y Código de Precisión (Código P). En la señal L1 se transmite en la portadora el código (C/A) y en la señal L2, se transmite en la portadora con el Código P, el cual, se empezó a utilizar en la generación del Bloque IIR-M de satélites GPS. El código C/A es más robusto en comparación con el código P, es utilizado para determinar la posición y la distancia evidente para el satélite. El código P es más preciso, pero está encriptado en el Código Y (Anti-Spoofing) y no puede ser decodificada sin tener una clave para el cifrado. Esto no está disponible para usuarios civiles. La señal L5 es relativamente nueva a comparación de las anteriores, ayuda a mejorar la corrección ionosférica, redundancia de la señal, mejora de la precisión de la señal y mejora el rechazo a la interferencia (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Tabla 2.1: Descripción de la señal GPS

Portadora	Frecuencia [MHz]	Longitud de onda [m]	Código Civil
L1	$154 \times 10,23 = 1575,42$	0,1903	<i>C/A</i>
L2	$120 \times 10,23 = 1227,60$	0,2442	<i>C/A</i>
L5	$115 \times 10,23 = 1176,45$	0,2548	<i>I + Q</i>

2.2. Ionosfera

La ionosfera es la parte de la atmósfera superior donde la densidad de electrones libres es lo suficientemente alta como para perturbar la propagación de las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (Hargreaves, 1992). Es la región de la atmosfera con mayor conductividad eléctrica, debido a la cantidad de iones positivos y electrones que aparecen como resultado de la interacción entre nuestra atmosfera neutra y la radiación solar (Palacios, 2010).

Los electrones libres se producen principalmente mediante la fotoionización de átomos neutros y moléculas de la atmósfera provocada por la radiación solar UV, pero muchos fenómenos físicos complejos en el entorno terrestre solar participan en la producción y el desprendimiento de electrones y en la determinación de su distribución espacial y variaciones temporales (Brunini et al., 2004).

Esta capa de la atmosfera es fundamental para las comunicaciones, ya que permite la transmisión de señales de radio a largas distancias, lo que es esencial para las comunicaciones de radio y televisión, así como para la comunicación por satélite (Union y Bureau, 1998). Además, es un componente importante del sistema de monitoreo global del clima, ya que puede influir en la temperatura, la presión y otros aspectos del clima en la Tierra. También, juega un papel crucial en el estudio del clima espacial, puesto que es sensible a los cambios en la actividad solar y a los flujos de partículas emitidos por el Sol, lo que la hace útil para el monitoreo de la actividad solar (Li et al., 2020). Existen distintos ciclos que tienen un impacto en la ionosfera, el ciclo solar, que ocurre en el Sol y se reinicia aproximadamente cada 11 años. Durante este ciclo, la actividad solar, como las manchas solares, las ráfagas solares y las tormentas geomagnéticas, aumenta y disminuye de manera sistemática. El ciclo solar comienza con un período de actividad solar baja, conocido como un mínimo solar, y luego aumenta hasta alcanzar un máximo solar. Durante el máximo solar, la actividad solar es más intensa y la cantidad de manchas solares, ráfagas solares y tormentas geomagnéticas es más elevada (Petrovay, 2020), provocando en cada uno de estos eventos perturbaciones ionosféricas. Existen otros ciclos que influyen en la ionosfera tales como el ciclo anual y el diurno, que dependen de las estaciones del año y del día terrestre respectivamente (Union y Bureau, 1998).

2.2.1. Estructura ionosférica

Debido a la dependencia de la altura de la composición y a las características de absorción de la atmósfera, la ionosfera terrestre presenta una estructura compleja y tridimensional que varía en diferentes latitudes y altitudes. Esto da lugar a la formación de distintas regiones ionosféricas. Estas regiones no solo difieren en su composición iónica predominante, sino que también en sus mecanismos de

formación (Zolesi y Cander, 2014).

Región D

Esta región, que se extiende hasta los 90 km, es la más baja de la ionosfera y se conoce como la región D. Su densidad de electrones es relativamente débil en comparación con las demás capas. Se desarrolla poco después del amanecer y desaparece poco después de la puesta de sol (Pavlov, 2014). La principal fuente de fotoionización son los rayos ultravioleta y, en menor medida, los rayos X. Aunque los rayos X contribuyen a la ionización, la radiación UV es más significativa, provocando la ionización de los gases neutros presentes (N_2 , O_2 y NO) y convirtiéndolos en iones como N_2^+ , O_2^+ y NO^+ (Briand et al., 2022).

Región E

Es una región ionosférica que se extiende entre 90 a 170 km de altura. Esta región de la ionosfera está dominada por los iones O_2^+ y NO^+ . El O_2^+ se produce principalmente por la fotoionización del oxígeno diatómico neutro y el NO^+ se produce por un rápido proceso de intercambio de carga entre los iones primarios O^+ , N_2^+ y O_2^+ . La ionización de la región E se mantiene durante la noche debido a la radiación de partículas solares, aunque disminuye considerablemente.

Dentro de la región E de la ionosfera, puede generarse esporádicamente una capa llamada Es, caracterizada por la acumulación temporal de altas concentraciones de iones entre 100 y 125 km de altitud (Haldoupis, 2012). Esta capa se forma debido a interacciones entre fenómenos meteorológicos, campos eléctricos y magnéticos, y corrientes de viento en la ionosfera, y su aparición puede ser potenciada por tormentas geomagnéticas y ráfagas solares, que inyectan

energía adicional en la ionosfera. La capa Es, que puede reflejar ondas de radio de frecuencias más altas de lo habitual, facilitando la propagación de señales a larga distancia y afectando las comunicaciones y la navegación, ha sido estudiada ampliamente con ionosondas terrestres, radares de dispersión incoherente y coherente, in situ con sondas de cohetes, y más recientemente con mediciones y estadísticas de ocultación de radio (RO) del sistema de posicionamiento global por satélite en órbita terrestre baja (Haldoupis et al., 2023).

Región F

La región F se divide en dos subregiones (F1 y F2) que se sitúan entre 170 km y 600 km.

La región F1, es una subregión inferior (170-200 km), mientras que la F2 se encuentra en la parte superior (200-600 km). Los principales iones primarios que se producen directamente por fotoionización son O^+ y N_2^+ . El ion del oxígeno atómico O^+ es el más abundante en esta región, ya que, no es común que el ion del oxígeno atómico pierda carga por recombinación radioactiva, siempre se convierte primero en ion molecular y luego el ion molecular pierde su carga por el proceso de recombinación disociativa. En otras palabras, la recombinación disociativa indirecta se lleva a cabo en el caso de la región F1. Mientras que en el caso de la región E, la recombinación disociativa se lleva a cabo directamente. Esta es la característica que distingue a las regiones E y F1 (Ratcliffe et al., 1972).

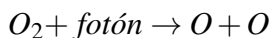
La región F2 es en la que se concentran la mayor cantidad de electrones, dicha región se encuentra aproximadamente entre 200 km y 600 km, es la región más variable e irregular para las predicciones y persiste durante el día y la noche. En esta región el ion de oxígeno atómico es el más abundante, con una tasa de producción

de iones mayor a las demás, debido al menor número de partículas neutras que allí se encuentran, la tasa de recombinación es proporcional a la densidad de electrones, en esta región, los tres procesos fotoquímicos contribuyen simultáneamente a su formación (Schunk y Nagy, 2000).

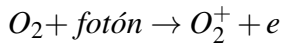
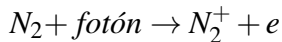
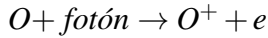
2.2.2. Procesos físicos y químicos en la ionosfera

Rishbeth y Garriott (1969) nombra a los procesos físicos de la ionosfera de la siguiente manera; fotoquímico, a la producción o destrucción de ionización y transporte a aquellos que resultan en movimiento de ionización. Los procesos fotoquímicos dominan la ionosfera inferior (regiones D y E), y encontraremos que la capa F2 se encuentra en un nivel de transición entre los regímenes dominados por "fotoquímica" y "transporte" en la ionosfera (Rishbeth y Garriott, 1969). La absorción de radiación solar ultravioleta, en latitudes bajas y medias, es el principal proceso de producción para la creación de pares de iones y electrones. Sin embargo, cuando se forman iones negativos en la ionosfera inferior mediante un proceso de unión, los electrones pueden liberarse por fotodesprendimiento, lo que proporciona otro mecanismo para la producción de electrones. Los fotones provenientes del Sol chocan con las partículas de la atmósfera, provocando que las partículas de la atmósfera absorban energía proveniente del Sol, a su vez, la absorción de dicha energía genera otros procesos importantes durante la absorción (Memarzadeh, 2009), los más importantes son los siguientes:

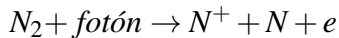
- El proceso de fotodisociación produce oxígeno atómico que no solo cambia la composición química de la atmósfera superior, sino también sus características de absorción.



- La fotoionización hace que la atmósfera superior se transforme en un medio conductor. Durante los procesos de absorción se genera calor, lo que eleva considerablemente la temperatura de la atmósfera superior. Fotoionización del oxígeno atómico, del nitrógeno y del oxígeno molecular respectivamente.

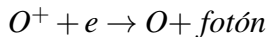


- La fotoionización disociativa es el mecanismo mediante el cual se disocia una molécula en un átomo y un ión. Es una combinación entre fotodisociación y fotoionización. Un ejemplo característico de la atmósfera es la fotoionización del nitrógeno molecular en un ión nitrógeno y n nitrógeno atómico.

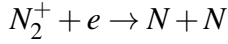
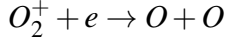


Como parte de la destrucción de la ionización, los iones se recombinan con electrones libres transformándose de nuevo en partículas neutras, una vez que los electrones son producidos por la radiación solar en la alta atmósfera, hay tres reacciones principales en las que los electrones pueden desaparecer al cabo de un tiempo (Memarzadeh, 2009):

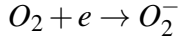
- Recombinación radiactiva: un electrón se combina con un ion atómico positivo produciendo energía y un átomo neutro.



- Recombinación disociativa: un electrón se combina con un ion molecular, produciendo dos átomos neutros.



- Acoplamiento: un electrón es atrapado por un átomo neutro produciendo un ion.



2.2.3. Eventos que perturban la ionosfera

Existen diferentes eventos que perturban la ionosfera, directa o indirectamente, a continuación hablaremos sobre el campo magnético, el cual, está estrechamente relacionado con la ionosfera, y sobre los eventos provenientes del Sol que la perturban.

Campo magnético

A lo largo del tiempo, se han realizado múltiples investigaciones que evidencian la conexión entre el campo geomagnético y la ionosfera (de Abreu et al., 2022; Sieradzki y Paziewski, 2019; Dugassa et al., 2019). En el contexto de las relaciones Sol-Tierra, la interacción entre el medio interplanetario y la magnetosfera terrestre emerge como uno de los temas más cruciales, según lo señalado por Ballatore (2002). Un componente fundamental para caracterizar la intensidad de las tormentas geomagnéticas es el uso de diversos índices, como el Kp, Ap y Dst. De estos, el más conocido y utilizado es el índice Dst, el cual permite medir perturbaciones geomagnéticas en distintos puntos del planeta (Rostoker, 1972; Bartels et al., 1939; Gonzalez et al., 1994a).

Gonzalez et al. (1999) ha llevado a cabo una clasificación detallada de las tormentas geomagnéticas, categorizando su grado de perturbación como se presenta en la Tabla 2.2. Estas tormentas pueden perdurar desde varias horas hasta incluso algunos días, y su ori-

gen, se asocia con eyecciones de masa coronal, agujeros en la corona solar o ráfagas solares (Fragoso, 2015).

El campo magnético terrestre, en una primera aproximación, puede conceptualizarse como un campo dipolar con su dipolo generador situado en el centro del planeta, inclinado aproximadamente $11,5^\circ$ respecto al eje de rotación terrestre (Basavaiah, 2012). La disposición dipolar provoca que el polo sur magnético apunte hacia el polo norte geográfico y viceversa, generando la percepción común de que el campo magnético terrestre se dirige hacia el norte, ya que las líneas de campo emergen del polo sur geográfico e ingresan en el polo norte geográfico (Ugalde, 2013). La intensidad del campo geomagnético también varía según la latitud, siendo ejemplificado en territorio mexicano, donde este valor fluctúa entre 40,000 y 46,000 nT aproximadamente, dependiendo de la ubicación geográfica (Tascione, 1988). La expresión del vector de campo magnético en un punto sobre la Tierra se realiza mediante un sistema de coordenadas (H, Z, I), donde Z representa la componente vertical (positiva hacia abajo sobre la vertical), H es la componente horizontal (positiva en dirección norte), e I es el ángulo de inclinación medido en grados, completando así el sistema ortogonal de coordenadas. Las unidades de Z y H son nanoteslas (Ugalde, 2013).

Las tormentas geomagnéticas son eventos espaciales provocados por perturbaciones en el campo magnético de la Tierra. Estas perturbaciones son causadas principalmente por la interacción entre el viento solar, que es una corriente de partículas cargadas emanadas del Sol, y el campo magnético terrestre (Koskinen, 2011). Cuando el viento solar interactúa con la magnetosfera de la Tierra, se generan corrientes eléctricas en la ionosfera y la magnetosfera. Estas corrientes pueden inducir variaciones en el campo magnético, dando lugar a las tormentas geomagnéticas. Estas tormentas pueden tener diversas intensidades y duraciones (Lakhina y Tsurutani, 2016; Haines et al.,

2019; Lazzús et al., 2022).

Durante una tormenta geomagnética, se observan cambios en la actividad geomagnética, como fluctuaciones en la intensidad del campo magnético y alteraciones en la corriente eléctrica en la ionosfera. Estos fenómenos pueden afectar las comunicaciones de radio, sistemas de navegación por satélite, y provocar auroras en las regiones polares (Oljira, 2023).

La escala de intensidad de tormentas magnéticas y el Índice Disturbio Geomagnético (DST) están relacionados en el sentido de que ambos se utilizan para cuantificar la actividad geomagnética, pero miden aspectos ligeramente diferentes.

- Escala de Intensidad de Tormentas Magnéticas:

La escala de intensidad de tormentas magnéticas se utiliza para clasificar la magnitud de una tormenta geomagnética. Una de las escalas más comunes es la Escala de Tormenta Geomagnética (G-Scale), que varía de G1 a G5, donde G1 representa tormentas débiles y G5 indica tormentas extremadamente fuertes (Navia et al., 2018).

- Índice Disturbio Geomagnético (DST):

El Índice DST es una medida cuantitativa de la actividad geomagnética. Se calcula midiendo las variaciones en el campo magnético terrestre causadas principalmente por las corrientes eléctricas en la magnetosfera. Un valor negativo de DST indica una tormenta geomagnética, y cuanto más negativo sea el valor, mayor será la intensidad de la tormenta (Gonzalez et al., 1994b).

Tabla 2.2: Clasificación de las Tormentas Geomagnéticas según su grado de perturbación sobre la ionosfera Gonzalez et al. (1999).

Tipo de Tormenta Geomagnética	Valor del índice Dst [nT]
Quieta	$-30 < Dst$
Débil	$-50 < Dst \leq -30$
Moderada	$-100 < Dst \leq -50$
Intensa	$-250 < Dst \leq -100$
Fuerte	$Dst \leq -250$

Eventos relación Sol-Tierra

Las ráfagas solares y las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) son eventos muy energéticas, las cuales pueden suceder de manera aislada o en conjunto (Pick, 2002). Las ráfagas solares constituyen emisiones significativas de radiación electromagnética proveniente del Sol, cuya duración oscila entre minutos y horas. La repentina liberación de la energía electromagnética se propaga a la velocidad de la luz, lo que implica que cualquier impacto en la atmósfera externa iluminada de la Tierra se manifiesta casi simultáneamente con la observación del evento. El aumento en los niveles de radiación de rayos X y ultravioleta extremo (EUV) resulta en la ionización de las capas inferiores de la ionosfera en el lado iluminado de la Tierra (Chen et al., 2020), generalmente se miden por el flujo máximo y se clasifican como A, B, C, M, X, ver Tabla 2.3.

En condiciones normales, las ondas de radio de alta frecuencia (HF) pueden mantener la comunicación a larga distancia mediante la refracción a través de las capas superiores de la ionosfera. No obstante, en el caso de una erupción solar lo suficientemente intensa, se produce ionización en las capas inferiores y más densas de la ionosfera, específicamente en la capa D. Las ondas de radio que

Tabla 2.3: Clasificación de las ráfagas solares en función de su intensidad, siguiendo el esquema establecido por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), que las categoriza en los tipos A, B, C, M y X, (Hospodka y Matějovie, 2022).

X-ray Flare	Flux (W/m^2)
A	$< 10^{-7}$
B	$10^{-7} - 10^{-6}$
C	$10^{-6} - 10^{-5}$
M	$10^{-5} - 10^{-4}$
X	$> 10^{-4}$

interactúan con electrones en estas capas pierden energía debido a las colisiones más frecuentes en el entorno de mayor densidad de la capa D. Esto puede dar lugar a la degradación o absorción completa de las señales de radio HF (Hospodka y Matějovie, 2022).

Es importante destacar que las ráfagas solares suelen originarse en regiones activas del Sol, que son áreas caracterizadas por la presencia de fuertes campos magnéticos, generalmente asociadas con grupos de manchas solares. A medida que estos campos magnéticos evolucionan, pueden llegar a un punto de inestabilidad y liberar energía en diversas formas, incluida la radiación electromagnética que se manifiesta como ráfagas solares (Chen et al., 2020).

Las eyecciones de masa coronal (EMC) son fenómenos solares extremadamente energéticos y complejos que involucran la expulsión de grandes cantidades de material solar y campos magnéticos desde la atmósfera exterior del Sol, conocida como la corona solar. Estas eyecciones constituyen un aspecto significativo de la actividad solar y están estrechamente relacionadas con la variabilidad

magnética y la dinámica de la atmósfera solar.

Las EMC se caracterizan por la liberación repentina de una porción sustancial de la corona solar en forma de plasma, partículas cargadas y campos magnéticos enlazados. Este fenómeno se asocia comúnmente con la reorganización de los campos magnéticos solares en las regiones activas, especialmente en presencia de intensos campos magnéticos torcidos (Howard, 2011).

El proceso de formación de una EMC se inicia con la acumulación de energía magnética en las estructuras de la corona solar, generalmente asociada con la presencia de manchas solares y regiones activas. Cuando la tensión magnética alcanza un punto crítico, se produce la liberación súbita de energía, provocando la eyección del material solar. Esta liberación de energía puede ser desencadenada por diversos eventos o interacciones entre campos magnéticos opuestos en la corona solar.

Los investigadores utilizan una variedad de instrumentos, como telescopios espaciales y observatorios terrestres, para observar y analizar estas eyecciones, con el objetivo de mejorar la predicción de sus efectos en la Tierra y en la tecnología espacial.

2.3. Contenido Total de Electrones (TEC)

El TEC en la ionosfera funciona como un parámetro que define su condición y variabilidad (Hargreaves, 1992), es un indicador de la variabilidad ionosférica, derivado de la señal GPS, que es modificada por los electrones libres en la ionosfera. Representa el número total de electrones presentes a lo largo de la trayectoria entre un satélite y un receptor terrestre. El rango nominal de TEC va desde

10^{16} electrones por metro cuadrado (e/m^2) hasta $10^{19} e/m^2$ a lo largo de la ruta de onda de radio. Este rango refleja los valores mínimos y máximos de TEC que típicamente ocurren en diferentes momentos del día, con los valores mínimos ocurriendo alrededor de la medianoche y los valores máximos en la tarde. Esta variación diurna está influenciada por la radiación solar, que ioniza más intensamente la atmósfera superior durante el día (Klobuchar, 1991; Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Comprender los entornos ionosféricos complejos sigue siendo un desafío significativo debido a la falta de observaciones directas, especialmente en regiones remotas y polares, como la Antártida. Las regiones polares son particularmente poco observadas, sin embargo, desempeñan un papel crucial en los fenómenos meteorológicos espaciales debido a la configuración del campo magnético terrestre. A pesar de estos desafíos observacionales, el TEC puede ser modelado tanto a nivel global como continental, proporcionando conocimientos valiosos sobre el comportamiento de la ionosfera y su impacto en varios sistemas tecnológicos. Los iones presentes en el TEC incluyen O^+ , H^+ , He^+ , NO^+ y O_2^+ (Bilitza et al., 2011), cada uno contribuyendo a la ionización general y la densidad electrónica.

El cálculo del TEC es posible para cada satélite basado en la ruta de la señal hacia el receptor. Este cálculo implica medir el retardo experimentado por la señal GPS al atravesar la ionosfera. El parámetro calculado de esta manera se conoce como TEC inclinado (sTEC). El sTEC representa el TEC a lo largo de la trayectoria real de la señal del satélite, que generalmente está en un ángulo inclinado con respecto a la dirección vertical (Figura 2.1). Esta inclinación significa que el valor de sTEC depende del ángulo de elevación del satélite en relación con el receptor. A menores ángulos de elevación, el camino a través de la ionosfera es más largo, lo que lleva a un mayor contenido total de electrones debido al mayor volumen de atmósfera

ionizada por el que pasa la señal.

En contraste, el TEC vertical (vTEC) se deriva del sTEC a través de una función de mapeo que tiene en cuenta el ángulo de elevación del satélite (Figura 2.2). El vTEC representa el TEC en la dirección vertical, estimado a una altura de 350 km en la trayectoria de la señal, proporcionando una medida más estandarizada de las condiciones ionosféricas. La función de mapeo típicamente utiliza un factor geométrico basado en el ángulo de elevación del satélite para convertir el TEC de la trayectoria inclinada a la dirección vertical. Esta conversión es crucial porque permite la comparación de valores de TEC de diferentes satélites y momentos, normalizando los datos a un marco de referencia común.

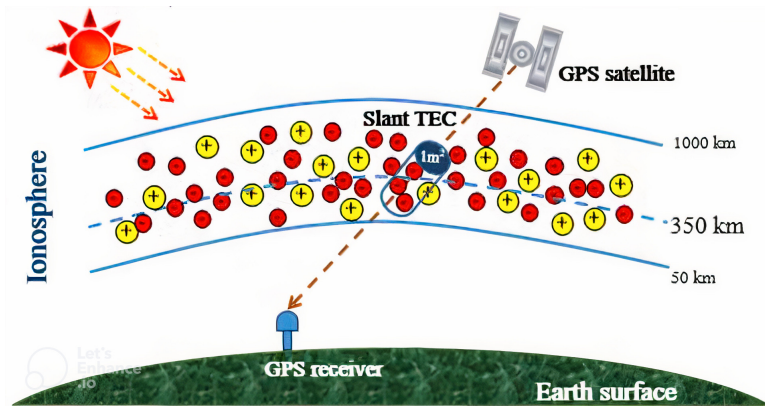


Figura 2.1: La figura muestra el STEC, que representa el número total de electrones en una columna de 1 m^2 a lo largo de la trayectoria entre un satélite GPS y un receptor en la Tierra. Los iones y electrones en la ionosfera afectan el STEC, permitiendo estudiar variaciones del TEC a diferentes alturas y su impacto en las señales GNSS. Fuente: Thai GNSS and Space Weather Information Data Center (2023).

La capacidad de medir y modelar el TEC tiene profundas implicaciones para comprender y mitigar el impacto de la ionosfera en los sistemas de comunicación y navegación. Por ejemplo, las variaciones en el TEC pueden causar retrasos y cambios de fase en las señales, lo que conduce a errores en los sistemas de posicionamiento basados en GPS. Al modelar con precisión el TEC, estos errores pueden preverse y corregirse, mejorando la confiabilidad y precisión de las aplicaciones GNSS. Además, las mediciones de TEC contribuyen a nuestra comprensión de los efectos de tormentas solares y perturbaciones geomagnéticas, que pueden tener impactos significativos tanto en tecnologías terrestres como satelitales.

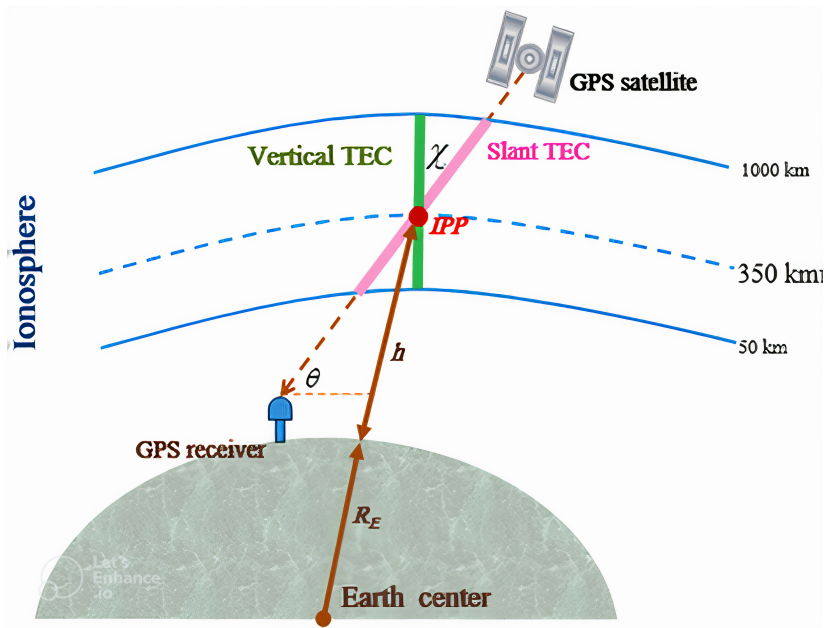


Figura 2.2: La figura muestra la geometría entre un satélite GPS y un receptor en la Tierra para medir el TEC. El STEC es el TEC medido en la trayectoria oblicua del satélite al receptor, mientras que el VTEC es el TEC proyectado verticalmente. El ángulo de elevación (θ) y el Punto de Penetración Ionosférica (IPP) permiten corregir el STEC para calcular el VTEC, proporcionando una medición vertical precisa del TEC en la ionosfera. Fuente: Thai GNSS and Space Weather Information Data Center (2023).

2.4. Wavelets (Ondeletas)

Las ondeletas son una poderosa herramienta matemática utilizada para descomponer funciones en diferentes niveles, permitiendo una representación versátil de datos y una aproximación funcional (Mallat, 1989a; Torrence y Compo, 1998). Son particularmente adecuados para manejar datos con variaciones y discontinuidades abruptas, lo que los hace invaluable en muchos campos, incluyendo el procesamiento de señales, la compresión de imágenes y la geofísica. El concepto fundamental detrás de las ondeletas es analizar funciones en diferentes escalas, lo que permite ajustar automáticamente la resolución de las ventanas para capturar diversos detalles dentro de una señal. Este análisis de multiresolución hace de las ondeletas una herramienta convincente y efectiva para numerosas aplicaciones (Alves et al., 2020).

La Transformada Discreta de Wavelet (DWT) es una implementación específica de transformadas wavelets que realiza una descomposición recursiva de una señal de entrada. Este proceso de descomposición implica dividir la señal en dos componentes más pequeños en cada nivel: una aproximación y un detalle (Daubechies, 1992). Estos componentes se denotan como $S_i(n)$ y $W_i(n)$, donde $S_i(n)$ representa la aproximación de la señal en el nivel i , y $W_i(n)$ representa el detalle en el mismo nivel. La aproximación captura la tendencia general de la señal, mientras que el detalle resalta los componentes de alta frecuencia y las variaciones.

La DWT opera aplicando un par de filtros, típicamente un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto, seguido de un submuestreo. El filtro pasa bajo extrae los coeficientes de aproximación, mientras que el filtro pasa alto extrae los coeficientes de detalle. Matemáticamente, la aproximación de la señal en el nivel $i + 1$ se puede obtener mediante el siguiente cálculo:

$$S_{i+1}(n) = \sum_k g(k) S_i(2n - k) \quad (2.1)$$

De manera similar, el detalle de la señal en el nivel $i + 1$ se calcula como:

$$W_{i+1}(n) = \sum_k h(k) S_i(2n - k) \quad (2.2)$$

A continuación se describen los parámetros de cada ecuación:

- $S_{i+1}(n)$: Representa la **señal aproximada** en el nivel $i + 1$, que es una versión suavizada de la señal S_i después de aplicar un filtro de paso bajo. Esta señal de aproximación conserva las características de baja frecuencia de la señal original y pierde los detalles de alta frecuencia.
- $g(k)$: Es el **coeficiente del filtro de paso bajo** en la convolución que genera $S_{i+1}(n)$. Este filtro elimina las componentes de alta frecuencia, preservando principalmente las frecuencias bajas, que corresponden a la estructura general de la señal.
- $S_i(2n - k)$: Es la señal de entrada en el nivel actual i evaluada en el punto desplazado $2n - k$. Este desplazamiento corresponde a un muestreo de la señal en puntos específicos para aplicar el filtro. El término $2n$ indica que el algoritmo considera la señal en pares de puntos (debido a una reducción de resolución, es decir, reducción de la señal a la mitad de su resolución).
- $W_{i+1}(n)$: Representa el **detalle de la señal** en el nivel $i + 1$, generado después de aplicar un filtro de paso alto. Este detalle contiene principalmente las componentes de alta frecuencia de la señal, es decir, los cambios o variaciones rápidas en la señal.

- $h(k)$: Es el **coeficiente del filtro de paso alto** utilizado en la convolución para calcular $W_{i+1}(n)$. Este filtro permite que las componentes de alta frecuencia pasen a la siguiente señal de detalle, mientras elimina las componentes de baja frecuencia.

En estas ecuaciones, 2.1 y 2.2 son los coeficientes de los filtros pasa bajo y pasa alto, respectivamente. Estas ecuaciones forman la base del algoritmo piramidal de Mallat (Mallat, 1989b), un método conocido para calcular la DWT. Este algoritmo permite una descomposición eficiente de múltiples niveles de señales, facilitando el análisis de sus diversos componentes de frecuencia.

La Figura 2.3 ilustra el algoritmo piramidal de Mallat para una descomposición de tres niveles. En cada nivel, la señal de entrada se divide en una aproximación y un detalle, los cuales se descomponen aún más en el siguiente nivel. Este enfoque jerárquico permite extraer tanto detalles gruesos como finos de la señal, proporcionando una visión integral de su estructura y comportamiento.

Las transformadas wavelets, incluida la DWT, ofrecen varias ventajas sobre las transformadas de Fourier tradicionales. Mientras que las transformadas de Fourier descomponen las señales en componentes sinusoidales de frecuencia fija, las transformadas wavelets proporcionan una representación tiempo-frecuencia que captura tanto el contenido de frecuencia como su variación en el tiempo (Sifuzzaman et al., 2009).

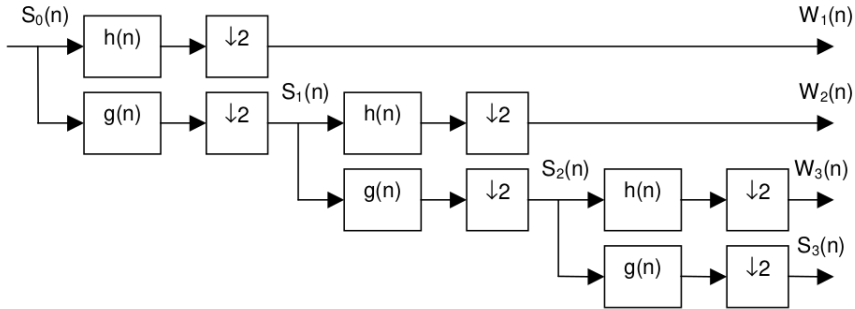


Figura 2.3: Diagrama de bloques del banco de filtros de análisis de la DWT (Colom et al., 2001).

En geofísica, las ondeletas se han utilizado para analizar diversos tipos de datos, como señales sísmicas, registros geomagnéticos y mediciones de TEC ionosférico (Lopez-Montes et al., 2015; Yang et al., 2023; Mendes Jr et al., 2005). La capacidad de descomponer señales en diferentes escalas permite a los investigadores identificar y aislar características específicas, como eventos transitorios o anomalías, que podrían estar ocultos en la señal original. Esta capacidad es fundamental para estudiar fenómenos que exhiben comportamiento multiescalar, como terremotos, tormentas solares y perturbaciones geomagnéticas.

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1. Datos Utilizados

El componente principal analizado durante los estudios ionosféricos fué el TEC. Sin embargo, fue necesario monitorear el estado del campo geomagnético y los eventos solares. El estudio se centró en analizar las ráfagas solares como una posible causa de perturbaciones esporádicas en la ionosfera.

Los datos RINEX utilizados en este estudio fueron compartidos por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La Figura 3.1 muestra la distribución de las estaciones GNSS (Tabla 3.1), que se monitorearon continuamente a un intervalo de medición de 20 Hz. Estas estaciones proporcionaron datos de alta resolución necesarios para un análisis detallado. Los datos utilizados para monitorear el campo magnético terrestre fueron generados por el Centro de Análisis de Datos Geomagnéticos y la Facultad de Magnetismo Espacial de la Universidad de Kyoto, específicamente a través del índice Dst, obtenido de mediciones en cuatro estaciones ecuatoriales. Estos datos permitieron caracterizar el entorno magnético durante los períodos de interés y correlacionar las variaciones del campo magnético con las perturbaciones io-

nosféricas.

Para monitorear las ráfagas solares, se utilizaron datos de los satélites GOES-16 y GOES-17, emitidos por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Estos satélites proporcionaron datos completos sobre la actividad solar, incluyendo la intensidad y el tiempo de las ráfagas solares, que fueron esenciales para tratar de identificar el origen de la energía que favorece las perturbaciones ionosféricas.

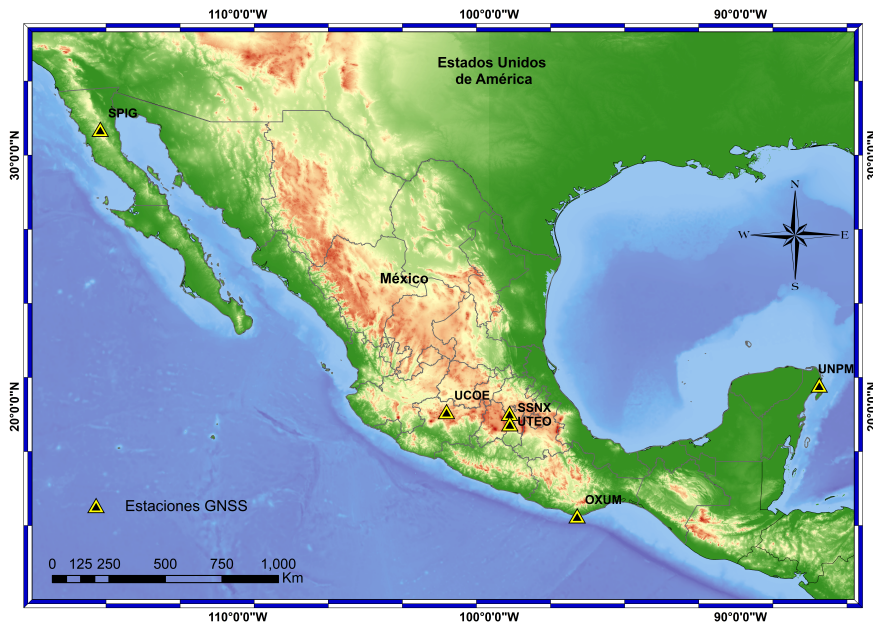


Figura 3.1: Mapa de distribución de las estaciones GNSS de la Red de la UNAM, utilizadas en el cálculo del TEC para el análisis de la ionosfera. Estas estaciones están ubicadas de manera que permiten una cobertura adecuada de la región, proporcionando datos clave para monitorear variaciones ionosféricas y su relación con los eventos.

Tabla 3.1: Coordenadas de las estaciones GNSS utilizadas, del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación WGS84 (m)
SPIG	31°02'45,87"	115°27'57,68"	2751.110
UCOE	19°48'47,47"	101°41'39,86"	1977.427
UNPM	20°52'06,66"	86°52'05,43"	-
OXUM	15°39'44,09"	96°29'56,50"	82.267
SSNX	19°19'37,78"	99°10'36,37"	2275.850
UTEO	19°44'28,46"	99°11'19,00"	2267.452

Los datos RINEX de estas estaciones GNSS incluyeron mediciones de alta frecuencia de la pseudo distancia y señales de fase de portadora, las cuales son esenciales para el cálculo preciso del TEC. La alta resolución temporal de 20 Hz permitió un análisis detallado de las variaciones del TEC y la identificación de estructuras ionosféricas a pequeña escala. El Centro de Análisis de Datos Geomagnéticos proporcionó datos sobre el campo magnético de la Tierra, que se utilizaron para evaluar las condiciones geomagnéticas durante el período de estudio. Esta información ayudó a comprender la relación entre la actividad geomagnética y las perturbaciones ionosféricas.

Los datos de los satélites GOES-16 y GOES-17 incluyeron mediciones del flujo de rayos X solares, que se utilizaron para identificar y caracterizar las ráfagas solares. Estos datos fueron fundamentales para correlacionar los eventos de ráfagas solares con las variaciones en el TEC, así como para analizar la respuesta de la ionosfera ante dichas ráfagas solares. Al integrar estas diversas fuentes de datos, se desarrollaron enfoques más detallados sobre las condiciones ionosféricas durante el período de estudio. Este enfoque integrador permitió un análisis de las perturbaciones ionosféricas, proporcionando valiosas ideas sobre las complejas interacciones dentro de la atmósfera terrestre.

3.2. Metodología

La metodología incluyó varios pasos detallados para garantizar un análisis integral del TEC ionosférico en relación con las ráfagas solares y la actividad geomagnética. A continuación, se describe cada paso del proceso:

3.2.1. Monitoreo de Ráfagas Solares

El monitoreo de las ráfagas solares fue un paso crítico en este estudio, dado el impacto significativo que estos eventos pueden tener en la ionosfera de la Tierra. Este proceso involucró varias etapas, comenzando con la selección de las fuentes de datos primarias, que fueron los satélites GOES-16 y GOES-17 operados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Estos satélites, equipados con instrumentos sofisticados capaces de detectar la actividad solar, proporcionaron datos continuos y en tiempo real sobre las ráfagas solares, incluyendo su tiempo, intensidad y duración. La identificación de eventos de ráfagas solares involucró el análisis de los datos de flujo de rayos X de los satélites GOES, con un enfoque en las ráfagas de tipo X debido a su alto potencial para causar perturbaciones ionosféricas significativas. Los criterios para seleccionar estos eventos incluyeron la intensidad de la ráfaga, el establecimiento de una ventana temporal de duración uniforme para cada evento, así como la consideración de que la ráfaga ocurriera durante el día local en las ubicaciones de las estaciones, lo que permitió una correlación con los datos ionosféricos.

Los datos brutos de los satélites GOES fueron calibrados para tener en cuenta los sesgos instrumentales, asegurando una representación precisa de la actividad solar. Los eventos de ráfagas identificados fueron contrastados con fuentes como el Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) y el Observatorio de Dinámica Solar (SDO) para su verificación, y su tiempo fue ajustado con las mediciones geomagnéticas y ionosféricas para una alineación temporal consistente. El análisis detallado de las características de cada ráfaga incluyó anotar la intensidad máxima, registrar la duración y trazar los perfiles temporales para visualizar la evolución de la ráfaga. Estos eventos identificados se correlacionaron con datos geomagnéticos del Centro de Análisis de Datos Geomagnéticos y la Facultad de

Magnetismo Espacial de la Universidad de Kyoto, así como con datos de TEC ionosférico de estaciones GNSS, para evaluar su efecto en el campo magnético de la Tierra y el comportamiento ionosférico.

Estudios de casos específicos de ráfagas solares prominentes de tipo X ilustraron la metodología, detallando el proceso de identificación y verificación, las respuestas geomagnéticas y ionosféricas correspondientes y el análisis del impacto de la ráfaga en el TEC, incluyendo visualizaciones de datos. Este enfoque integral tenía como objetivo proporcionar una comprensión robusta de cómo las ráfagas solares influyen en la ionosfera.

3.2.2. Análisis del Comportamiento del Campo Magnético

El análisis del comportamiento del campo geomagnético fue un componente clave del estudio, proporcionando información sobre el impacto de las ráfagas solares y otras perturbaciones geomagnéticas en la ionosfera terrestre. Las estaciones geomagnéticas pueden medir las tres componentes ortogonales del campo magnético terrestre (H, D y Z) con alta resolución temporal, lo que permite un análisis detallado de las fluctuaciones geomagnéticas. Sin embargo, en este estudio nos enfocamos específicamente en el índice Dst para examinar las variaciones en el campo geomagnético durante los eventos de ráfagas solares.

Para cada evento de ráfaga solar identificado, se extrajeron los datos geomagnéticos correspondientes y se sincronizaron con el tiempo de la ráfaga solar, asegurando que el análisis capturara con precisión la respuesta geomagnética. Se seleccionó una ventana temporal que incluyó una semana antes y tres días después de cada evento,

dado que en los días de las ráfagas el campo magnético no estaba perturbado por tormentas geomagnéticas. Además, se definió un período de línea base previo a cada ráfaga para establecer las condiciones geomagnéticas normales antes del evento.

Los resultados se interpretaron en el contexto de los objetivos generales del estudio, discutiendo el tiempo y la duración de las perturbaciones geomagnéticas en relación con los eventos de ráfagas solares, la intensidad de las variaciones del campo geomagnético inducidas por las ráfagas solares y la identificación de frecuencias específicas o bandas espectrales afectadas. Este análisis integral tenía como objetivo proporcionar una comprensión detallada de cómo las ráfagas solares influyen en el entorno magnético de la Tierra y, posteriormente, en la ionosfera.

3.2.3. Cálculo del TEC

Los datos principales utilizados para el cálculo del TEC se derivaron de las estaciones GNSS, específicamente los datos RINEX proporcionados por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estas estaciones monitorean continuamente las señales de los satélites GNSS, registrando los retrasos de propagación causados por los electrones ionosféricos. Los datos incluían mediciones de pseudorango (C1, P2) y fase de portadora (L1, L2), esenciales para calcular el TEC.

Se emplearon dos métodos principales para calcular el TEC:

- **Método de Pseudorango:** El TEC se calculó utilizando la Ecuación 3.1, que correlaciona la diferencia entre las mediciones de pseudorango de dos frecuencias (R_1 y R_2) con el TEC. Este método, aunque ruidoso, debido a la mayor variabilidad y fluctuaciones en los datos causadas por factores como la imprecisión en la medición, el

multipath y los errores instrumentales, proporciona valores de TEC no ambiguos, adecuados para el análisis inicial (Araujo, 2005).

$$TEC_R = 9,52(R_1 - R_2) \quad (3.1)$$

• **Método de Fase de Portadora:** El TEC también se derivó de las mediciones de fase de portadora utilizando la Ecuación 3.2, que calcula el TEC basado en la diferencia de fase (Φ_1 y Φ_2) entre dos frecuencias (λ_1 y λ_2). Este método ofreció resultados menos ruidosos, pero requiere aplicar un ajuste utilizando el TEC por pseudorange (Rodríguez, 2017).

$$TEC_\Phi = 9,52(\lambda_1 \cdot \Phi_1 - \lambda_2 \cdot \Phi_2) \quad (3.2)$$

Análisis Combinado del TEC

En línea con las prácticas de investigación actuales (Araujo, 2005; Rodríguez, 2017; de Abreu et al., 2022), el estudio exploró el método combinado de análisis del TEC (Ecuación 3.3). Este método integró el TEC derivado de pseudorange para refinar los valores de TEC basados en la fase de portadora, utilizando el enfoque de "nivel inclinado" para mejorar la precisión y confiabilidad en la estimación de la densidad de electrones ionosféricos (Figura 3.2).

$$TEC_c = TEC_\Phi - (TEC_\Phi - TEC_R) \quad (3.3)$$

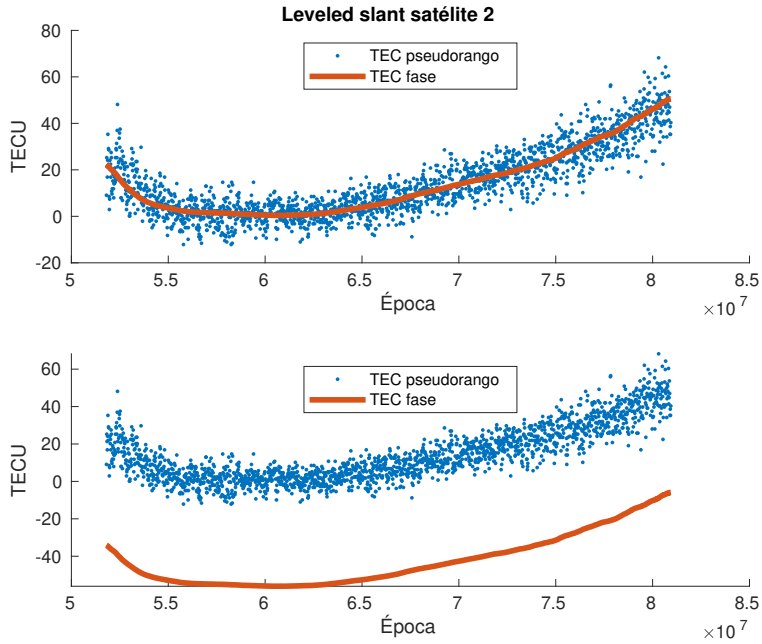


Figura 3.2: Corrección de TEC-pseudorange al TEC-fase: Este procedimiento aplica una corrección para transformar los valores precisos del TEC calculados a partir de la fase de la señal (TEC-fase) a una corrección que elimina la ambigüedad usando los valores del TEC obtenidos mediante pseudorange.

Se utilizó la Ecuación 3.4 para convertir el TEC en trayecto inclinado (STEC) en TEC vertical (VTEC), considerando el radio de la Tierra y la altura de la ionosfera sobre la superficie terrestre. Esta función de mapeo ajustó las mediciones de STEC para estimar las variaciones de densidad de electrones a lo largo de trayectos verticales, esencial para comprender las respuestas ionosféricas a las ráfagas solares y las perturbaciones geomagnéticas.

$$VTEC = STEC \cdot \cos \left[\arcsin \frac{R_e \cos(\theta)}{R_e + h} \right] \quad (3.4)$$

Aquí, R_e representa el radio de la Tierra (6371.2 km) y θ denota el ángulo de elevación entre el satélite y el receptor.

El análisis combinado del TEC facilitó un examen detallado temporal y espacial de las fluctuaciones de densidad electrónica ionosférica durante los eventos de ráfagas solares. Se emplearon técnicas de análisis de series temporales para detectar y caracterizar cambios rápidos en el TEC asociados con el inicio y los períodos de máxima intensidad de las ráfagas solares ver Figura 3.3.

Al integrar datos de pseudorango y fase de portadora, el estudio mejoró la precisión de las estimaciones de densidad electrónica ionosférica, crucial para mejorar la navegación satelital, la confiabilidad de las comunicaciones. La robustez metodológica y el rigor analítico subrayan su importancia en el avance del entendimiento de la dinámica ionosférica bajo condiciones solares variables, apoyando los esfuerzos para mitigar los impactos en sistemas tecnológicos sensibles a las perturbaciones ionosféricas.

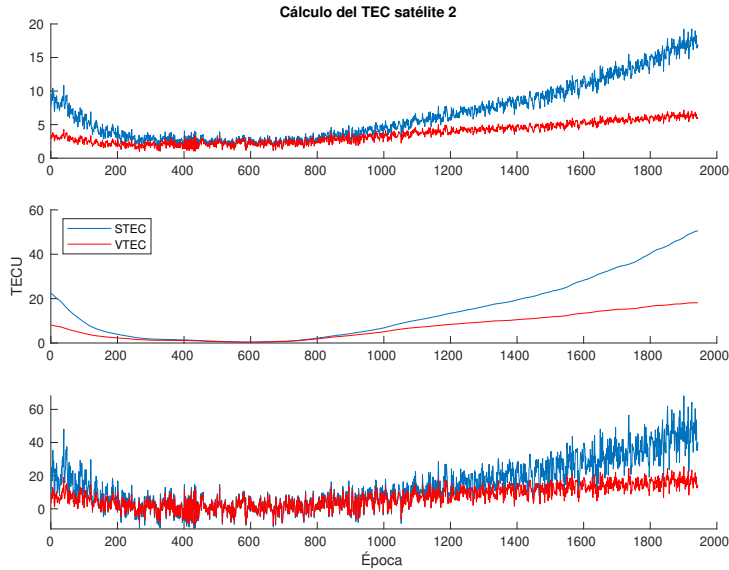


Figura 3.3: La Figura muestra los resultados del TEC en inclinación y vertical producidos por el programa. El gráfico superior corresponde al TEC derivado del pseudorange, el gráfico intermedio al TEC de la fase portadora, y el gráfico inferior al TEC combinado.

3.2.4. Análisis de Ondeletas

El análisis de ondeletas desempeñó un papel fundamental en este estudio para examinar las características temporales y espectrales de las variaciones del TEC. Esta sección detalla la metodología y los hallazgos del análisis de ondeletas, enfatizando su aplicación en la comprensión de componentes de alta frecuencia y patrones temporales en la densidad electrónica ionosférica.

Se empleó la transformada de ondeletas Haar debido a su efectividad para capturar cambios abruptos en los datos, característica fundamental en el análisis de series temporales de TEC (Amerian et al., 2010; Sohn et al., 2009). Esta elección permitió descomponer los datos en diferentes componentes de frecuencia, facilitando un análisis multirresolución de las perturbaciones ionosféricas y permitiendo la detección de eventos transitorios y variaciones rápidas en el TEC asociadas con la actividad de las ráfagas solares. El estudio utilizó la DWT, que descompone la señal en componentes de aproximación (baja frecuencia) y detalle (alta frecuencia) a través de múltiples niveles (Figura 3.4 y 3.5). Es importante aclarar que, cuando mencionamos WD7 y WD8, estamos haciendo referencia a los coeficientes de detalle obtenidos al aplicar la transformada wavelet a los Niveles 7 y 8, respectivamente. Estos coeficientes capturan las variaciones o detalles presentes en la señal analizada en esos niveles específicos de descomposición.

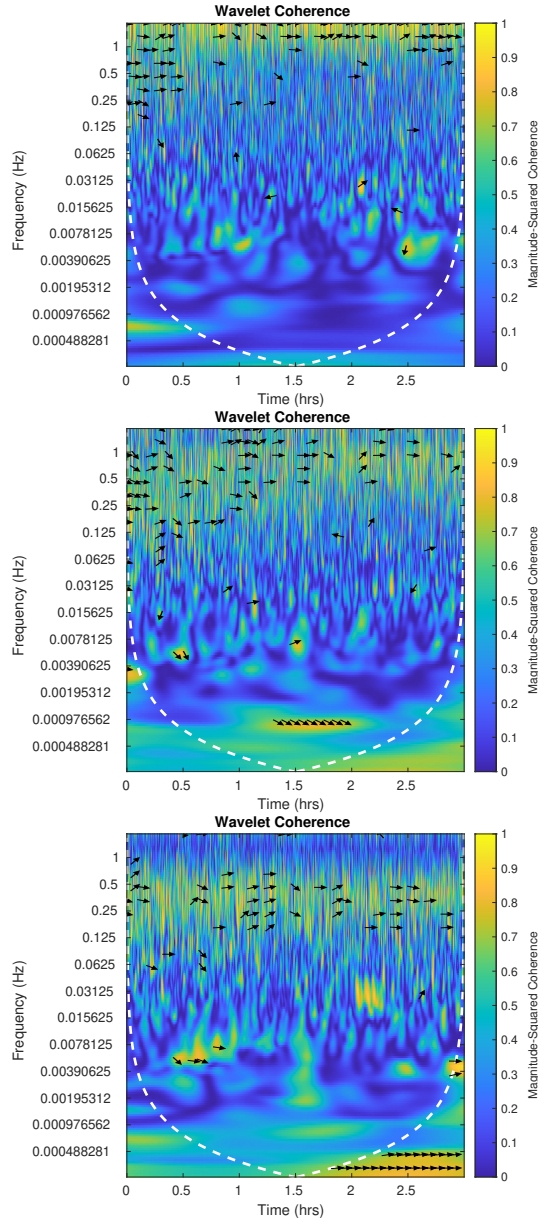


Figura 3.4: Para los niveles 1, 2 y 3 (imagen superior, media e inferior), que corresponden a frecuencias altas y medias-altas, se observa una coherencia baja entre el VTEC y los detalles de ondeleta, especialmente en el nivel 1, donde la correlación es mínima. En el nivel 2, la coherencia aumenta ligeramente, con algunas áreas localizadas, mientras que en el nivel 3 se aprecian patrones más claros de coherencia en ciertas regiones de tiempo y frecuencia, indicando que las fluctuaciones del VTEC en escalas medias tienen una correlación más significativa.

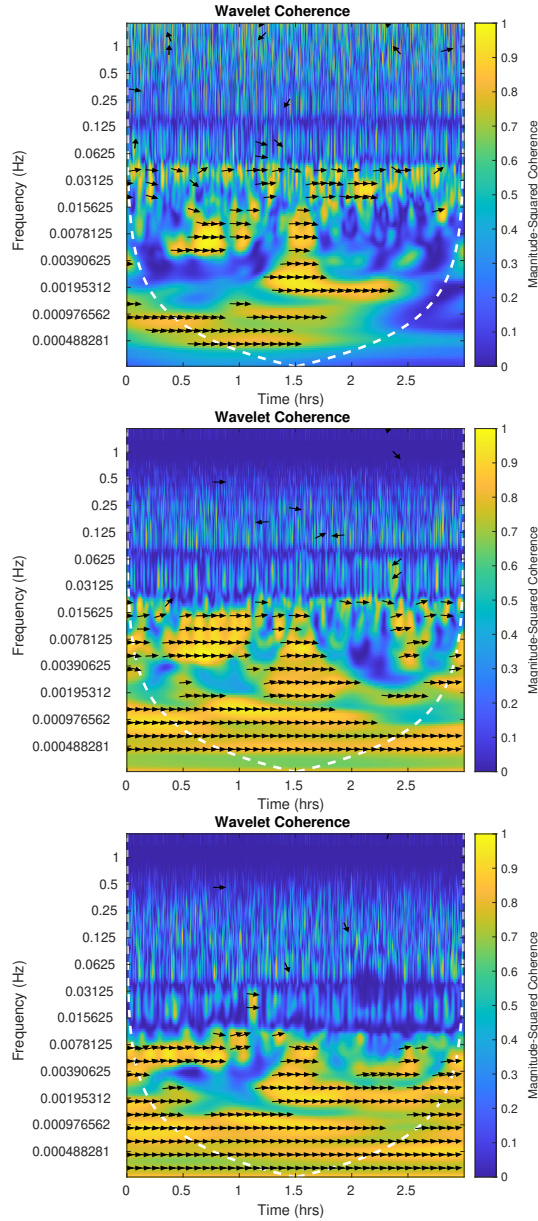


Figura 3.5: En los niveles 6, 7 y 8 (imagen superior, media e inferior), correspondientes a frecuencias medias-bajas y bajas, la coherencia aumenta considerablemente. En el nivel 6 se observan áreas más extensas de alta coherencia, que se amplían aún más en los niveles 7 y 8, lo que indica que las variaciones de baja frecuencia del VTEC están fuertemente correlacionadas con los detalles capturados en estas escalas más largas de tiempo.

Basado en las respuestas de los datos, los niveles 8 y 9 mostraron el mejor rendimiento en la captura de variaciones significativas, por lo que se decidió llevar a cabo la descomposición de ondeletas en nueve niveles para capturar de manera efectiva tanto las tendencias de baja frecuencia como las variaciones de alta frecuencia en los datos de TEC. Los Niveles 7 y 8 fueron identificados como óptimos para revelar patrones temporales detallados y características espectrales relevantes para las perturbaciones ionosféricas inducidas por el sol. Los coeficientes de ondeletas obtenidos de la descomposición en cada nivel fueron analizados para evaluar su correlación con eventos de ráfagas solares y perturbaciones geomagnéticas.

El análisis de ondeletas proporcionó información sobre la evolución temporal de las fluctuaciones de densidad electrónica ionosférica durante los eventos de ráfagas solares. Las representaciones tiempo-frecuencia mostraron cómo los distintos niveles de la transformada wavelet capturaron las variaciones del TEC en el tiempo, resaltando las frecuencias principales relacionadas con los eventos. La identificación de los niveles wavelet 7 y 8 como los más adecuados para detectar perturbaciones ionosféricas mejora la capacidad de análisis en futuros estudios para identificar frecuencias asociadas a ráfagas solares. Esto podría beneficiar las comunicaciones satelitales, los sistemas de navegación y otras aplicaciones tecnológicas sensibles a las condiciones de la ionosfera.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1. Eventos

En este estudio, se analizaron seis eventos de ráfagas solares tipo X que ocurrieron durante 2021 y 2022 utilizando la metodología descrita en el capítulo anterior. Estos eventos, con intensidades que van desde X1.0 hasta X1.5, fueron seleccionados por su intensidad, lo que los convierte en candidatos para examinar las variaciones en el TEC y comprender las interacciones sol-terrestres. La Tabla 4.1 proporciona información detallada sobre cada uno de estos eventos, incluyendo la fecha, hora e intensidad de las ráfagas solares. El análisis incluyó un proceso de múltiples etapas, comenzando con la identificación de las ráfagas solares dentro del periodo de disponibilidad de datos, seguido de la caracterización de cada evento de erupción solar, su ubicación en el disco solar y la verificación de que el evento ocurriera durante el día local en las ubicaciones de las estaciones. El análisis de ondeletas, como se describe en el Capítulo 3, se aplicó a los datos de TEC para descomponer la respuesta en diferentes componentes de frecuencia. Esto permitió un examen detallado de las características temporales y espectrales de las perturbaciones ionosféricas causadas por las ráfagas solares.

Los resultados del análisis de ondeletas se presentan en las figuras 4.3 a 4.34, cada uno dividido en tres segmentos clave. El primer segmento ilustra los valores de intensidad de la ráfaga solar, proporcionando una representación visual de la fuerza y duración de la erupción, siendo crucial para correlacionar las características de la erupción con la respuesta ionosférica posterior. El segundo segmento del gráfico muestra los valores de TEC a lo largo del tiempo, mostrando cómo fluctuó la densidad electrónica ionosférica en respuesta a la erupción solar. Este segmento también incluye una comparación entre los coeficientes de ondeletas y los valores de TEC, permitiendo identificar las escalas de ondeletas más sensibles a las perturbaciones ionosféricas inducidas por las ráfagas solares. El tercer segmento del gráfico de las figuras 4.3 a 4.34 presenta una vista completa de todos los niveles de ondeletas, permitiendo un análisis detallado de los componentes de frecuencia que contribuyen a las variaciones observadas en TEC. Esta descomposición de ondeletas multinivel proporciona una comprensión detallada de cómo diferentes bandas de frecuencia responden a los eventos de erupción solar, destacando la naturaleza compleja y multifacética de las perturbaciones ionosféricas. La Figura 4.1 ilustra las posiciones de las ráfagas solares en el disco solar, un aspecto de gran importancia para comprender las características espaciales de las interacciones sol-terrestres.

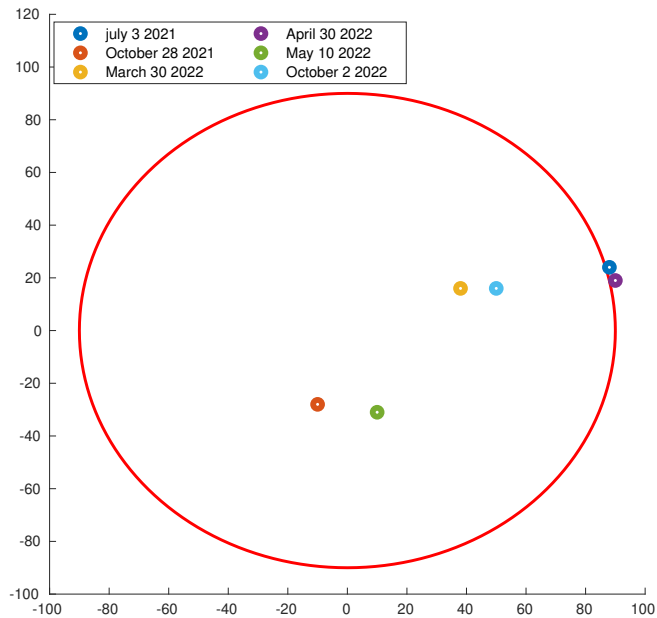


Figura 4.1: Ubicación de las ráfagas solares en el disco solar para los eventos analizados en 2021 y 2022. Los puntos de colores representan las posiciones de cada ráfaga en distintas fechas, mientras que el círculo rojo indica el borde del disco solar.

Tabla 4.1: Características de los eventos

Date	Day GPS	Start Time (UT)	Peak Time (UT)	End Time (UT)	Flare Class	Stations
03 Julio 2021	184	14:18	14:29	14:34	X1.5	SPIG-UCOE-UNPM OXUM-SSNX-UTEO
28 Octubre 2021	301	15:17	15:35	15:48	X1	SPIG-UCOE-UNPM
30 Marzo 2022	89	17:21	17:37	17:46	X1.3	SPIG-UCOE-UNPM OXUM-SSNX
30 Abril 2022	120	13:37	13:47	13:52	X1.1	SPIG-UCOE-UNPM OXUM-SSNX
10 Mayo 2022	130	13:50	13:55	13:59	X1.5	SPIG-UCOE-UNPM OXUM-SSNX
2 Octubre 2022	275	19:53	20:25	20:34	X1.0	UCOE-SSNX-UTEO

4.1.1. 3 Julio del 2021

El evento del día 3 de julio del 2021, tuvo lugar en la región AR12838, ubicada en la zona N24 W88, alcanzando una intensidad mayor en la ráfaga de tipo X1.59, iniciando a las 14:18 UTC y alcanzo su mayor intensidad a las 14:29 UTC, finalizando a las 14:34 UTC. Aunque el evento se generó en el limbo, se lograron detectar alteraciones en la ionosfera debido a la ráfaga solar. Durante el periodo de tiempo del evento, tenemos información de 6 estaciones GNSS (UTEO, UNPM, OXUM, SPIG, SSNX y UCOE), con un promedio de información de 5 satélites para cada una de las estaciones durante la hora del evento, con una ventana que va de las 13:00 UTC a 15:00 UTC. Las Figuras 4.3 - 4.8 muestran los resultados de las ondeletas para este evento. En las cuales, es posible identificar el evento en cuestión, sin embargo, en la estación SSNX, a pesar de identificar el evento, existen alteraciones en la señal que no se muestran en otros receptores, a pesar de interactuar con los mismos satélites, por lo tanto, para el caso de esta estación podría decirse que esto se debe a perturbaciones independientes a la ráfaga solar, o incluso ruido por parte del receptor. El Satélite 30 presento alteraciones al inicio de la ventana de tiempo para todos los receptores, a pesar de ello, es posible identificar las alteraciones que se tuvieron debido a la ráfaga solar. Los satélites 15 y 19 de la estación SPIG, son lo que tuvieron una peor respuesta, complicando así identificar de manera clara el evento, una posible causa de esto, podría ser la ubicación de la estación, la cual se encuentra más al norte las estaciones estudiadas.

La ráfaga solar ocurrió el 3 de julio de 2021, pero según los datos del campo magnético y el satélite GOES 17, el día anterior (2 de julio de 2021) estuvo tranquilo (sin perturbaciones externas en la ionosfera). En consecuencia, para realizar una comparación, aplicamos los mismos algoritmos a este día tranquilo, obteniendo como resultado alteraciones aleatorias e incongruentes. Esto contrasta con cuando

ocurre una ráfaga solar, lo que provoca perturbaciones en todas las estaciones en un momento específico (durante el evento de la ráfaga solar). Para cada uno de los eventos, seguimos el mismo procedimiento, generando un gráfico para un día tranquilo y otro para el día del evento (Figura 4.2).

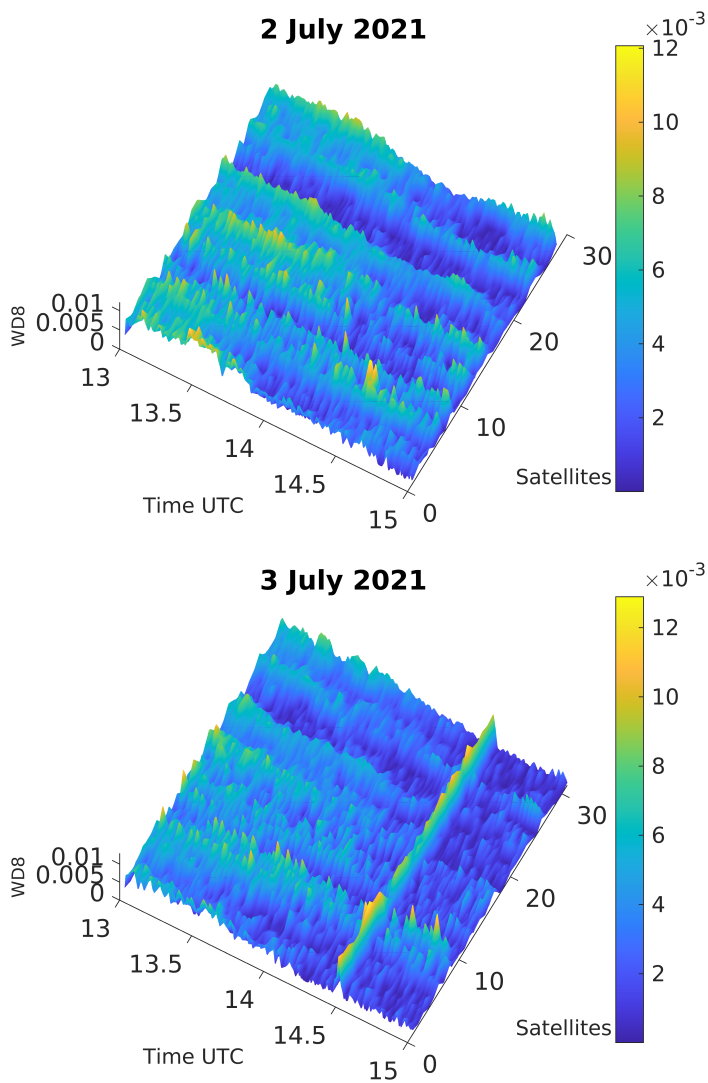


Figura 4.2: Comparación entre un día calmado (2 de julio de 2021, imagen superior) y el evento del 3 de julio de 2021 (imagen inferior). Se observan fluctuaciones más intensas en el evento del 3 de julio, destacadas por mayores valores en la escala de colores, lo que indica un aumento significativo en la actividad. Los gráficos muestran el comportamiento de la relación VTEC con el número de satélites, donde los picos más pronunciados el día del evento reflejan posibles perturbaciones ionosféricas relacionadas con la actividad observada.

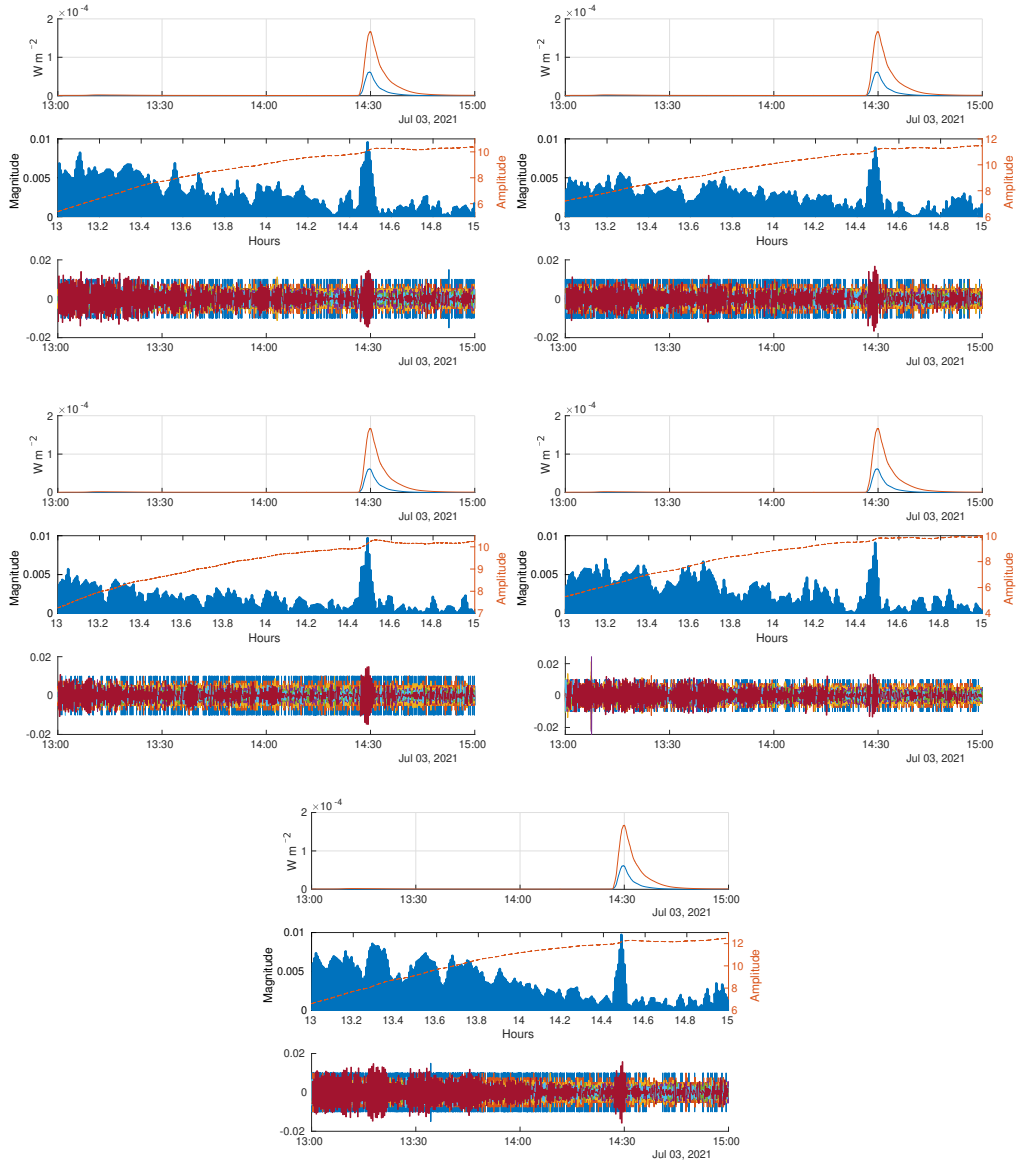


Figura 4.3: Representación gráfica del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado en la estación UTEO, con análisis correspondiente a los satélites GPS 14, 17, 19, 28 y 30. Cada panel incluye la evolución de la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones del TEC y la descomposición de ondeletas multiescala, proporcionando una visión de las respuestas ionosféricas inducidas por el evento.

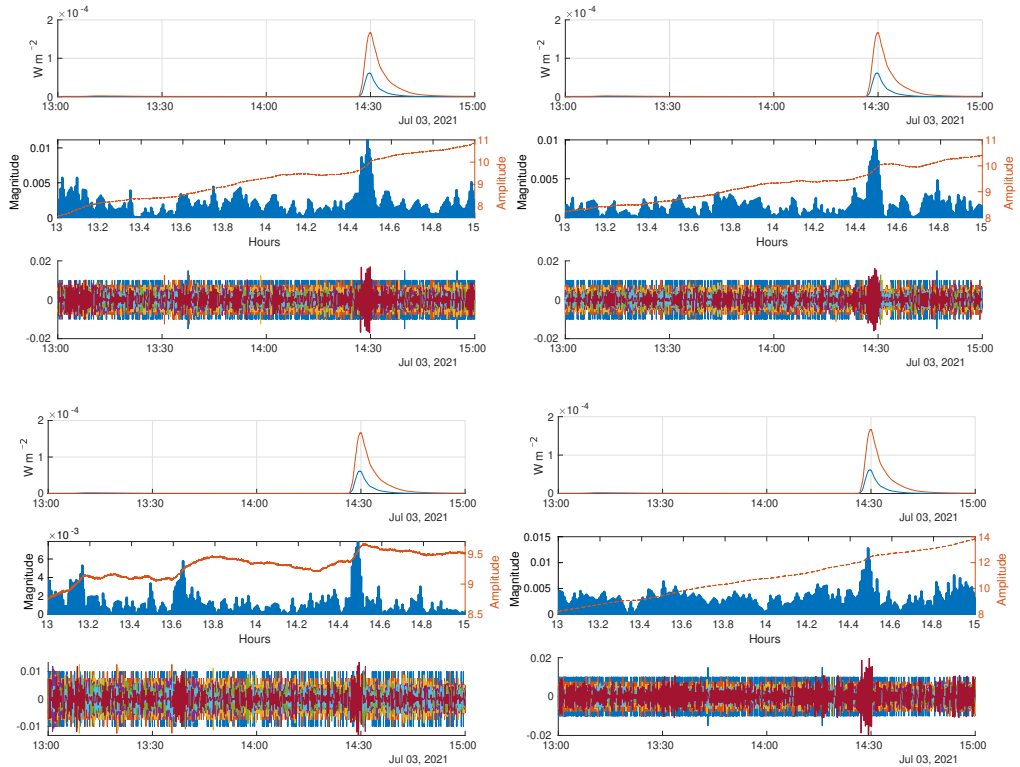


Figura 4.4: Representación gráfica del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado en la estación UNPM. Los datos analizados corresponden a los satélites GPS 13, 17, 19 y 30, mostrando la evolución de la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y la descomposición de ondeletas multiescala.

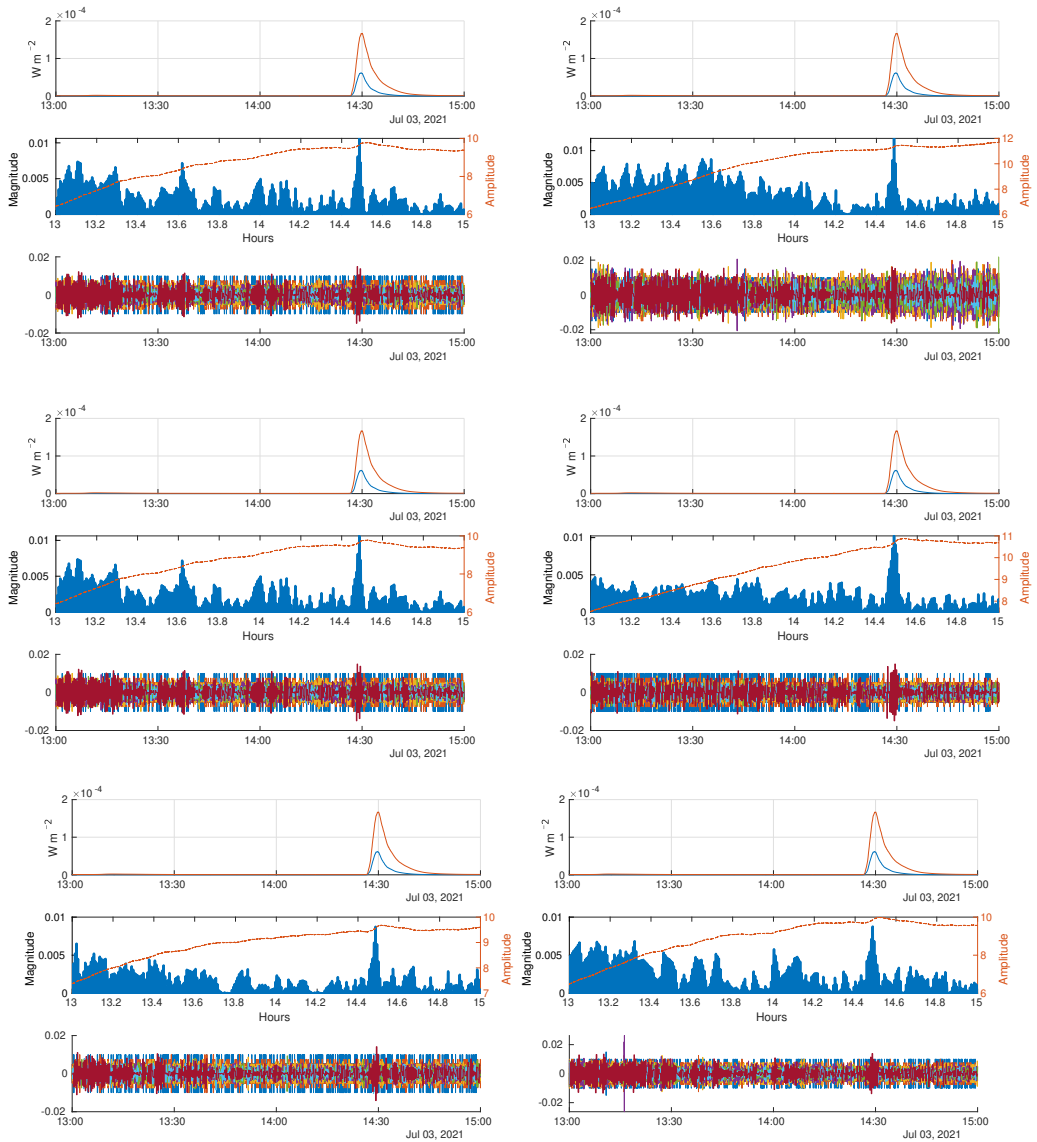


Figura 4.5: Representación gráfica del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado en la estación OXUM. Los datos analizados corresponden a los satélites GPS 7, 13, 14, 17, 19 y 28, mostrando la evolución de la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y la descomposición ondeletas multiescala, lo que permite una evaluación de las respuestas ionosféricas inducidas por el evento.

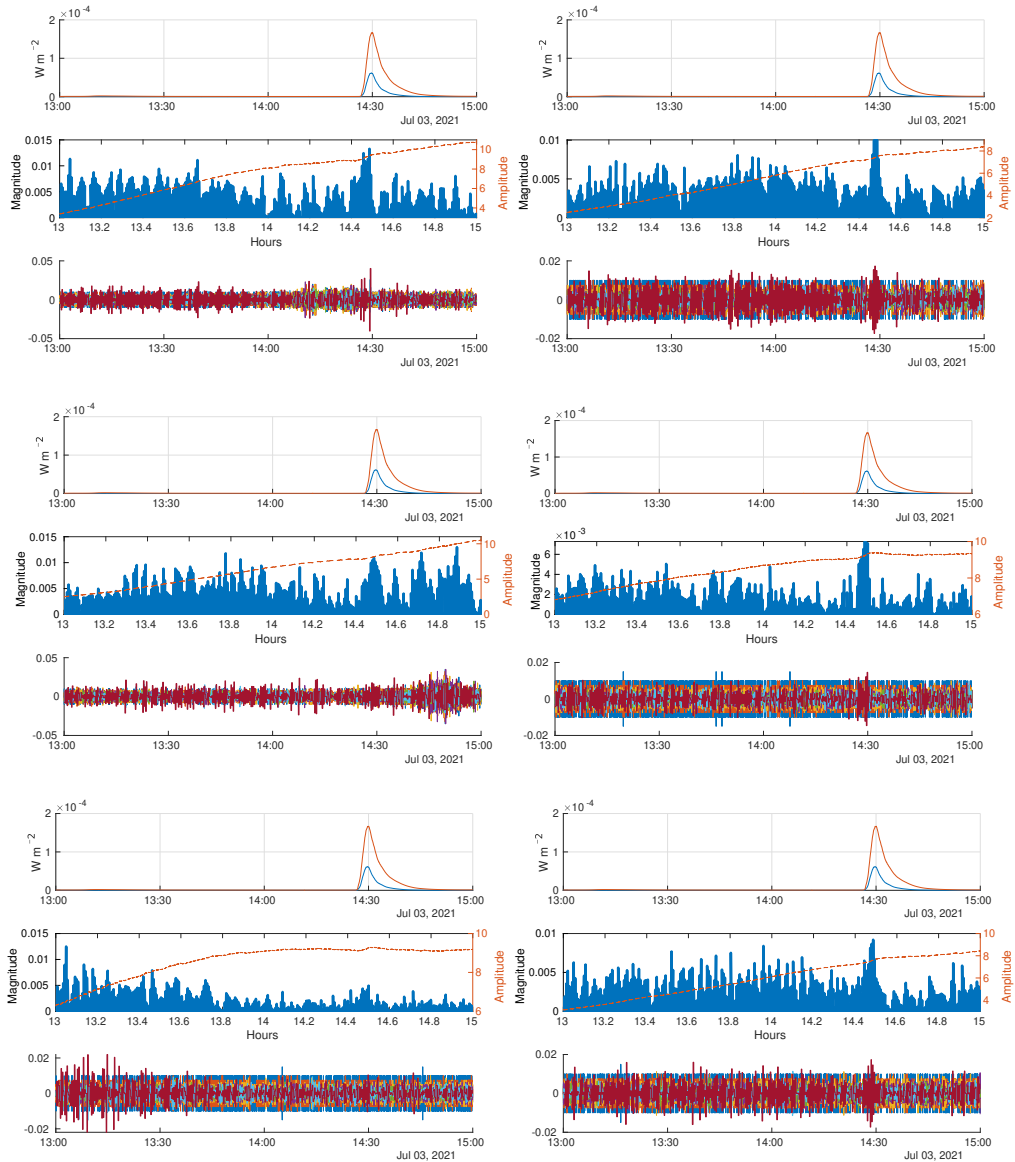


Figura 4.6: Representación gráfica del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado desde la estación SPIG. Se analizaron datos de los satélites GPS 13, 14, 15, 17, 19 y 28, incluyendo la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones del TEC y su descomposición ondeletas multiescala.

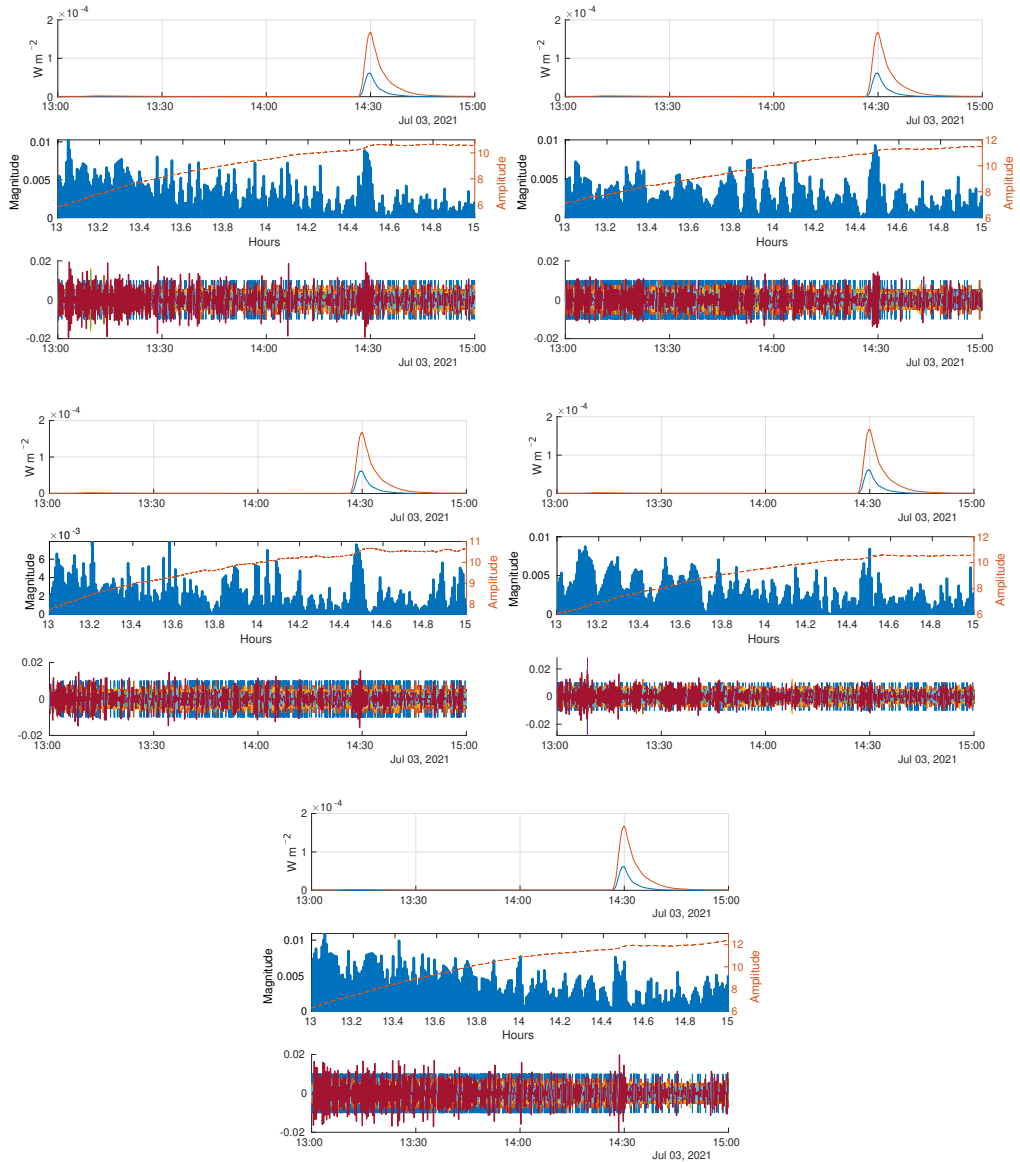


Figura 4.7: Representación gráfica del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado en la estación SSNX. Los datos analizados corresponden a los satélites GPS 14, 17, 19, 28 y 30, mostrando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición de ondeletas multiescala.

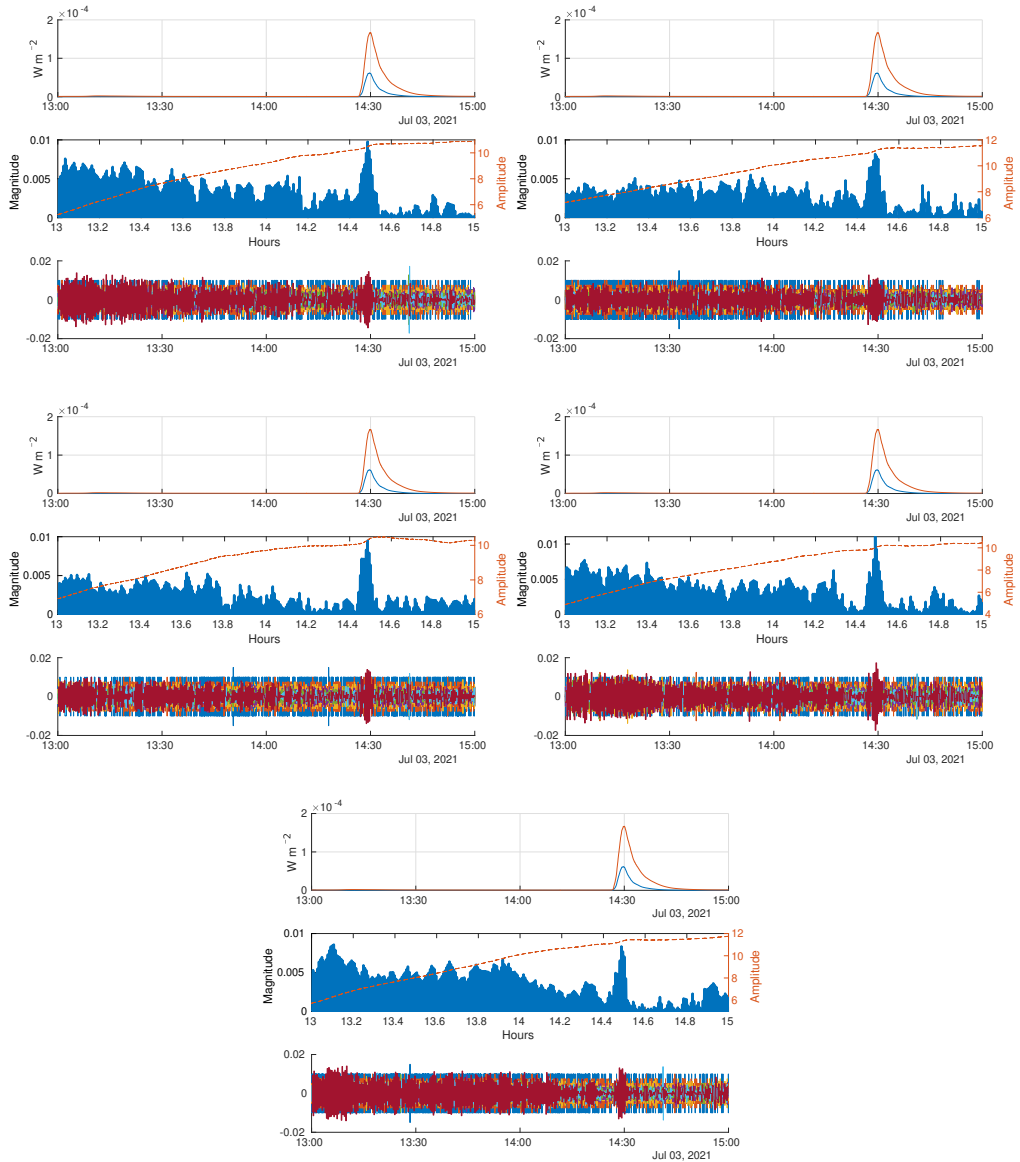


Figura 4.8: Gráfica representativa del evento solar del 3 de julio de 2021, registrado desde la estación UCOE. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 14, 17, 19, 28 y 30, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición de ondeletas multiescala, para un análisis de las perturbaciones ionosféricas causadas por el evento.

4.1.2. 28 Octubre del 2021

Durante el día 28 de octubre, ocurrieron dos ráfagas intensas una de M8.77 y otra de X1.06, la ráfaga de tipo X, alcanzo su mayor intensidad a las 15:35 UTC, iniciando a las 15:17 UTC y finalizando a las 15:48 UTC, dicha ráfaga fue originada por la region solar AR12887, ubicada en la siguiente ubicacion; S28 E10.

Los resultados de ondeletas para este evento se muestran en las Figuras 4.10 - 4.12, es posible apreciar el impacto de la ráfaga para las 3 estaciones implementadas en este evento (UNPM, SPIG y UCOE), teniendo una alteración considerable para todos los satélites, justo en el momento de la ráfaga, sin embargo, el satélite 24 presenta una alteración atípica a las 17:48 UTC, lo cual podría estar asociada a ruido por parte de dicho satélite, ya que las estaciones en las que se presentan están considerablemente separadas.

El evento del día 28 de octubre, presentó características comparables al evento anterior, aunque en este caso contábamos con menos satélites disponibles en todas las estaciones. No obstante, una perturbación pronunciada es evidente, coincidiendo con la ocurrencia de la ráfaga solar. Sin embargo, durante el día tranquilo, las alteraciones aparecen de manera aleatoria, careciendo de un patrón consistente atribuible a las interrupciones inducidas por la ráfaga (Figura 4.9).

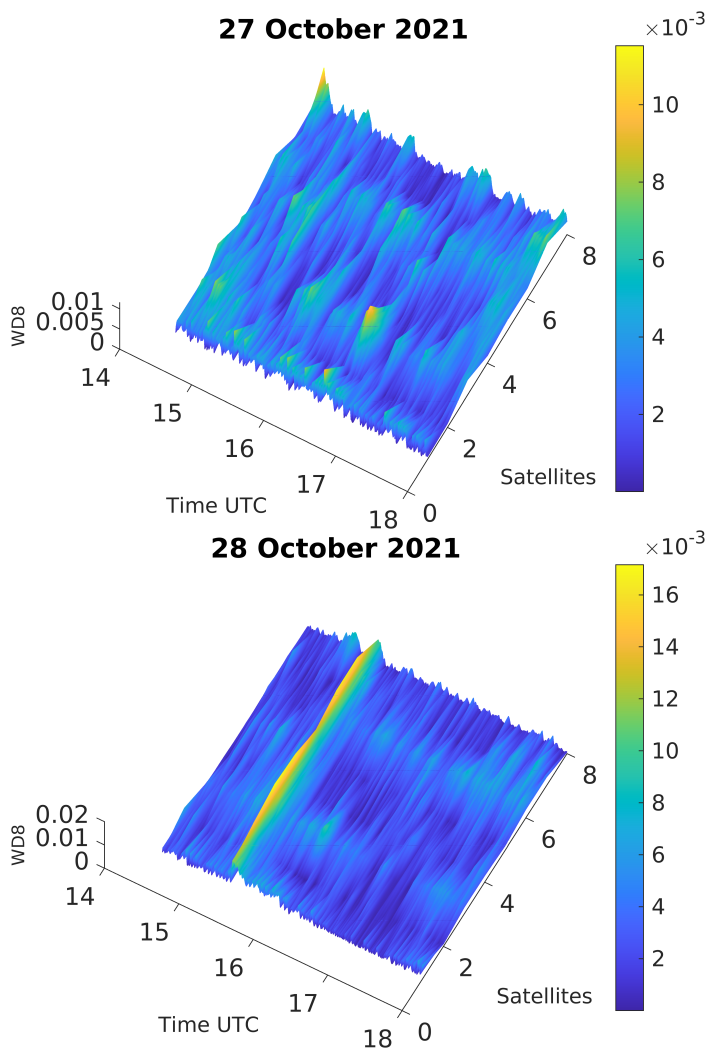


Figura 4.9: Comparación entre un día calmado (27 de octubre de 2021, imagen superior) y el evento del 28 de octubre de 2021 (imagen inferior). Se observa una mayor intensidad de fluctuaciones durante el evento del 28 de octubre, representada por los picos en la escala de colores, lo que sugiere una actividad ionosférica más fuerte.

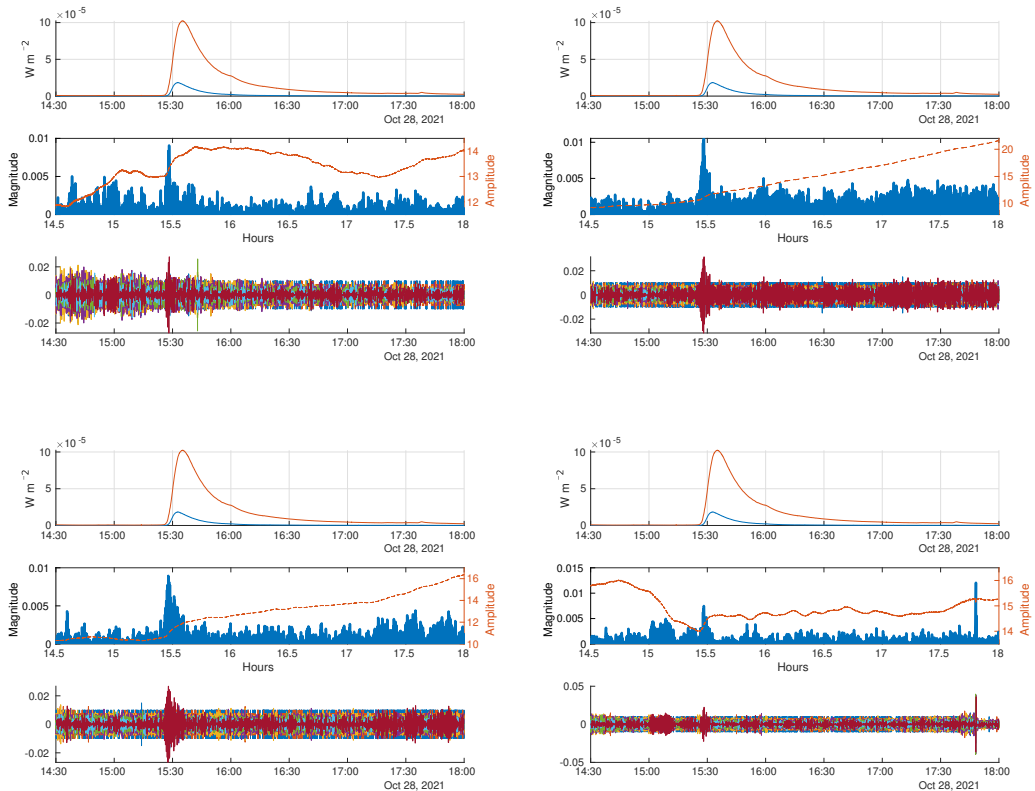


Figura 4.10: Gráfica representativa del evento solar del 28 de octubre de 2021, observado desde la estación UNPM. El análisis incluye datos recopilados de los satélites GPS 10, 18, 23 y 24, resaltando la intensidad de la ráfaga solar, las fluctuaciones en el contenido total de electrones (TEC) y su descomposición mediante las ondeletas multiescala.

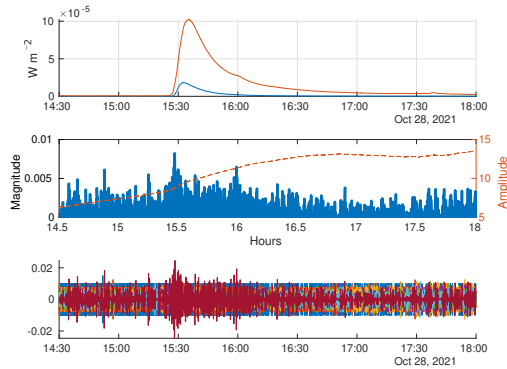


Figura 4.11: Gráfica representativa del evento solar del 28 de octubre de 2021, observado desde la estación SPIG. El análisis se realizó utilizando datos del satélite GPS 23, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición mediante las ondeletas multiescala.

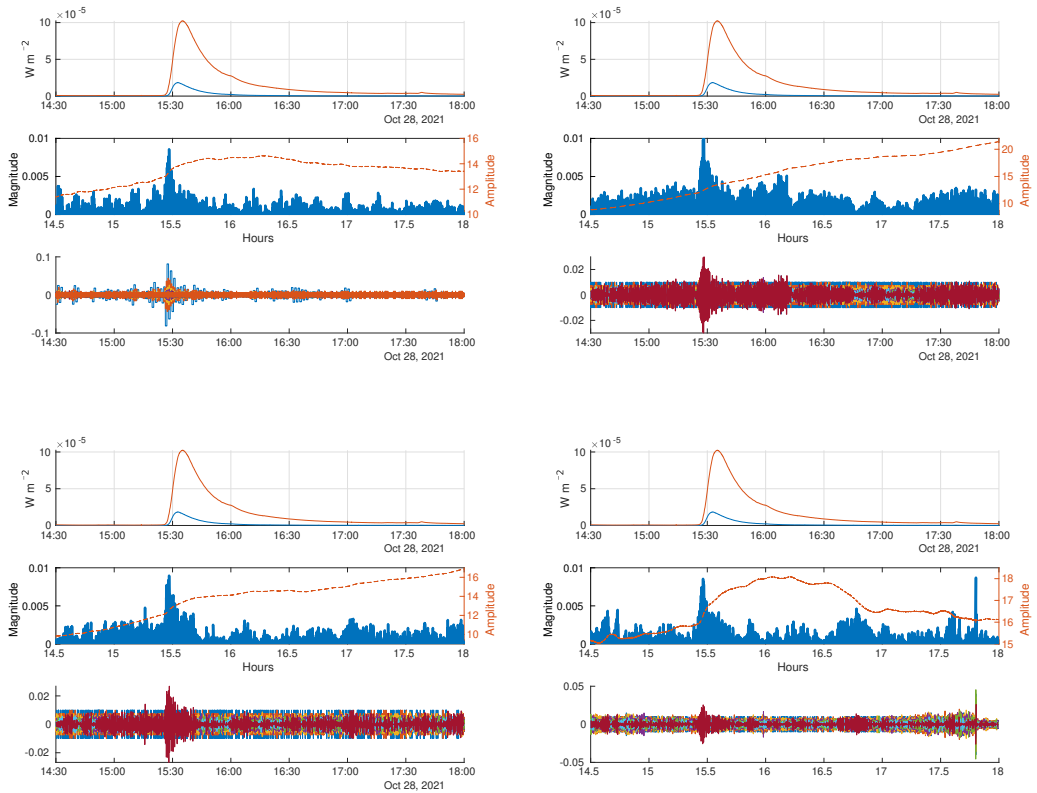


Figura 4.12: Gráfica representativa del evento solar del 28 de octubre de 2021, capturada desde la estación UCOE. El estudio incluyó datos de los satélites GPS 10, 18, 23 y 24, enfocándose en la intensidad de la ráfaga solar, las fluctuaciones del contenido total de electrones y su análisis multiescala mediante las ondeletas.

4.1.3. 30 Marzo del 2022

El 30 de marzo del 2022 el sol emitió una ráfaga solar en la región AR12975, la cual alcanzó una intensidad de tipo X1.38, se originó en la ubicación N16 W38, iniciando a las 17:21 UTC, alcanzando su mayor intensidad a las 17:37 UTC y finalizando a las 17:46 UTC. Dicho evento género alteraciones en la ionosfera que fueron visibles en todas las estaciones analizadas (UNPM, OXUM, SPIG, SSNX y UCOE), y para el caso de los satélites 7 y 30 se observaron aumentos en el ruido de la señal después del evento (Figuras 4.15 - 4.18).

En esta ocasión, las alteraciones también fueron perceptibles, aunque no tan pronunciadas como las anteriores. Sin embargo, sigue siendo posible identificar el momento de la ráfaga solar. Los resultados del día tranquilo muestran alteraciones que no estarían relacionadas con la ráfaga, si no más bien podría estar relacionado con ruido aleatorio (Figura 4.13).

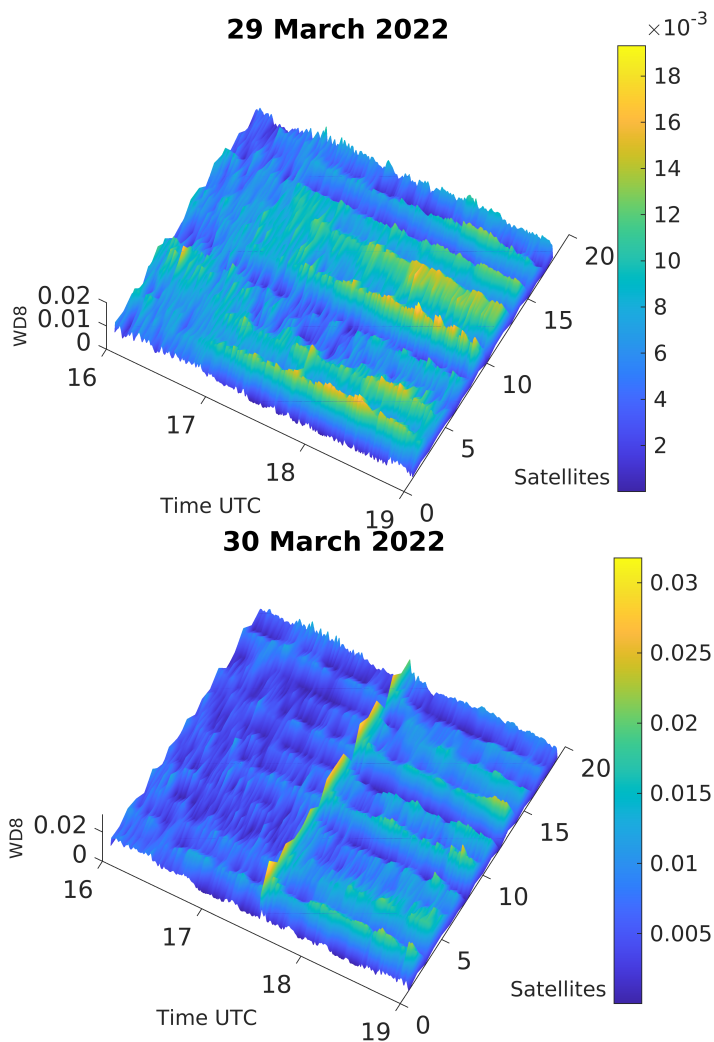


Figura 4.13: Comparación entre un día calmado (29 de marzo de 2022, imagen superior) y el evento del 30 de marzo de 2022 (imagen inferior). Las fluctuaciones más intensas durante el evento del 30 de marzo son evidentes, con picos más altos en la escala de colores, lo que indica una perturbación ionosférica significativa en comparación con el comportamiento más estable del día anterior. Se muestran las variaciones del VTEC en función del número de satélites, destacándose el impacto del evento en la ionosfera.

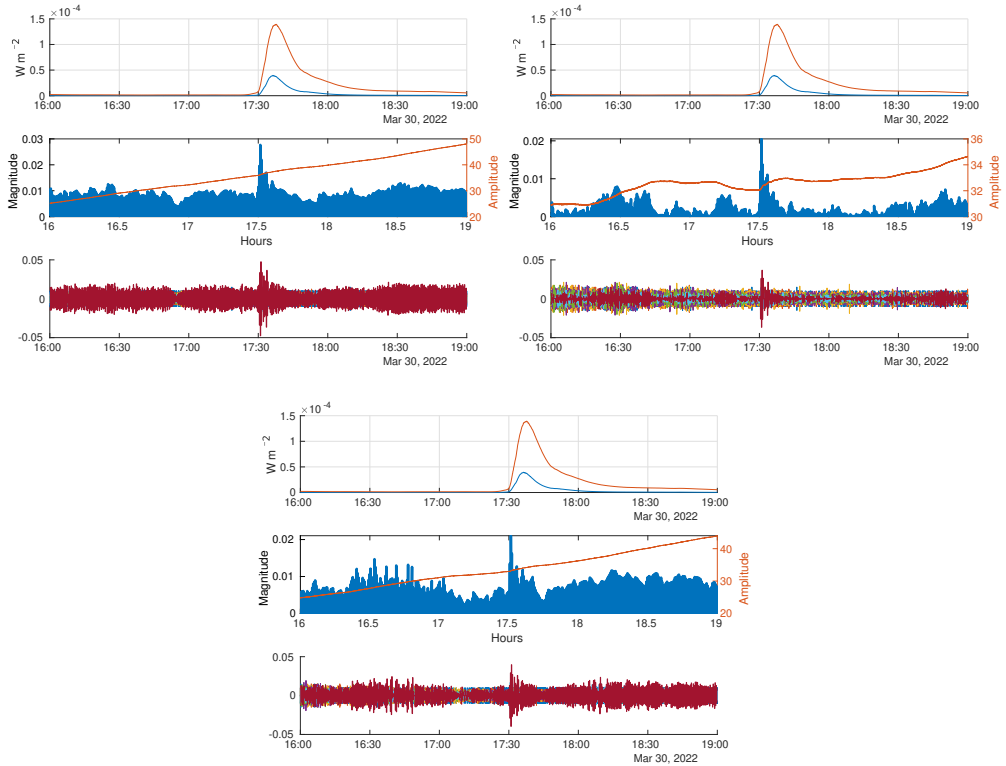


Figura 4.14: Gráfica representativa del evento solar del 30 de marzo de 2022, registrada desde la estación UNPM. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 7, 14 y 30, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el contenido total de electrones y su descomposición multiescala mediante las ondeletas.

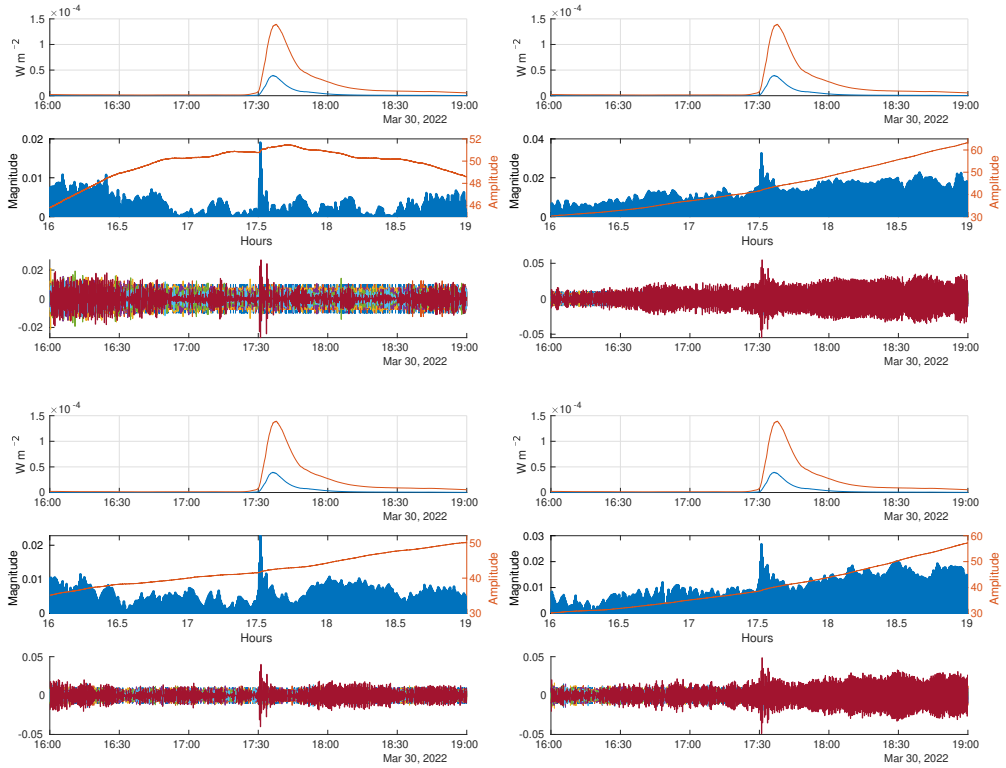


Figura 4.15: Gráfica representativa del evento solar del 30 de marzo de 2022, registrada desde la estación OXUM. El análisis incluyó datos obtenidos de los satélites GPS 1, 7, 14 y 30, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas, permitiendo un estudio de las perturbaciones ionosféricas asociadas al evento.

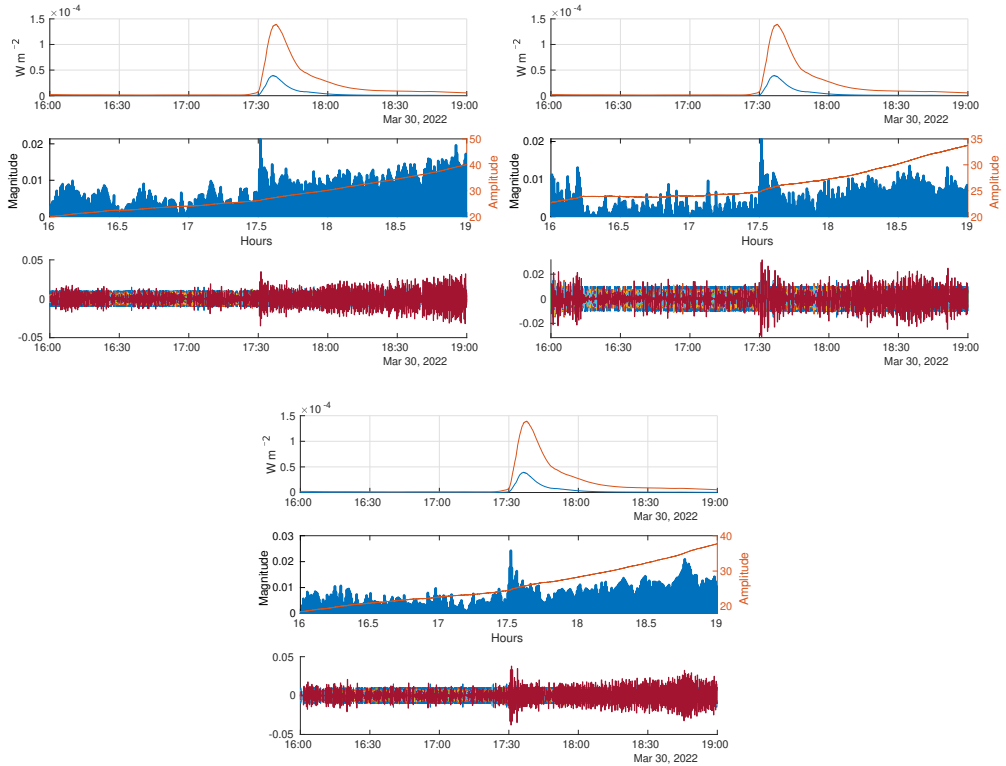


Figura 4.16: Gráfica representativa del evento solar del 30 de marzo de 2022, registrada desde la estación SPIG. Se analizaron datos de los satélites GPS 7, 14 y 30, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

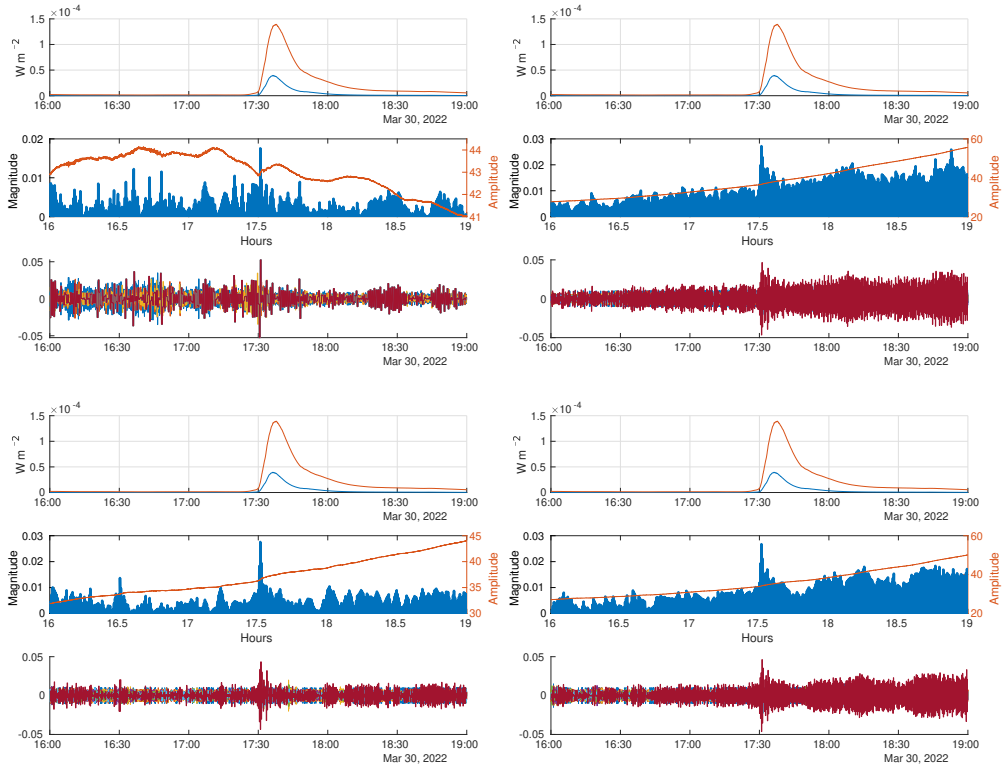


Figura 4.17: Representación gráfica del evento solar del 30 de marzo de 2022, observada desde la estación SSNX. El estudio incluyó datos recopilados de los satélites GPS 1, 7, 14 y 30, resaltando la intensidad de la ráfagas solar, las variaciones en el TEC y su análisis multiescala con ondeletas.

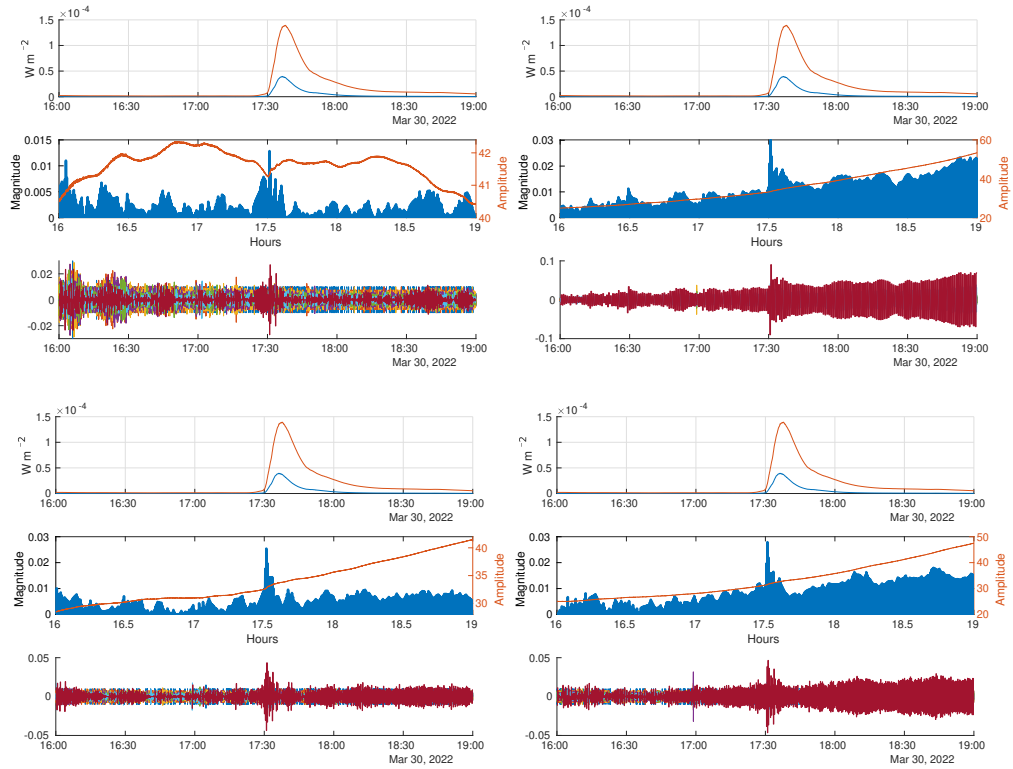


Figura 4.18: Gráfica representativa del evento solar del 30 de marzo de 2022, registrada desde la estación UCOE. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 1, 7, 14 y 30, enfocándose en la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

4.1.4. 30 Abril del 2022

El evento del 30 de abril del 2022 sucedió en la región de manchas solares AR12994, ubicada en el disco solar en N19 W90, a pesar de encontrarse en esta ubicación, es posible analizar el impacto que se tiene en la ionosfera terrestre de dicha ráfaga, que se generó a las 13:37 UTC, tuvo su punto máximo a las 13:47 UTC y finalizó a las 13:52 UTC. Los resultados de este evento muestran un incremento considerable de las ondeletas después del evento, esto es un patrón visible cuando la ráfaga no tuvo mucho impacto, en este caso se aprecia principalmente en el satélite 4, además, es posible apreciar que no existe tanto impacto para la estación SPIG como en las demás, debido a que esta estación se encuentra más al norte, esto mismo sucedió en el otro caso en que la ubicación de la ráfaga en el disco solar estuvo muy cerca del limbo.

Durante este evento, observamos patrones más distintivos del ciclo diurno en el día tranquilo. A medida que la ionosfera comienza a cargarse, se detectan frecuencias que impactan en los resultados de las ondeletas. Una vez que el aumento disminuye, las ondeletas también disminuyen. Sin embargo, en lo que respecta a la detección del evento, el día del evento es claramente distinguible y conciso (Figura 4.19).

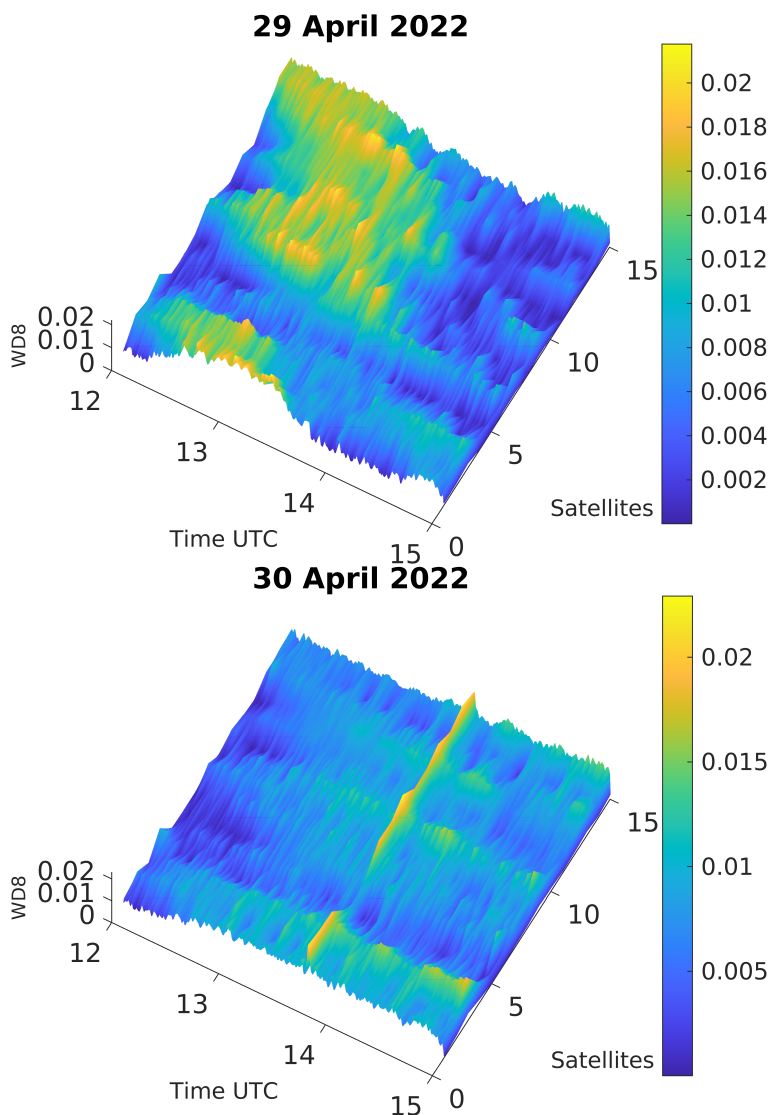


Figura 4.19: Comparación entre un día tranquilo (29 de abril de 2022, imagen superior) y el evento del 30 de abril de 2022 (imagen inferior). Las fluctuaciones más intensas durante el evento del 30 de abril son claramente visibles, con picos más altos en la escala de colores, lo que sugiere una perturbación ionosférica notable en contraste con el comportamiento estable del día anterior. Se observan las variaciones del VTEC en función del número de satélites, subrayando el efecto del evento en la ionosfera.”

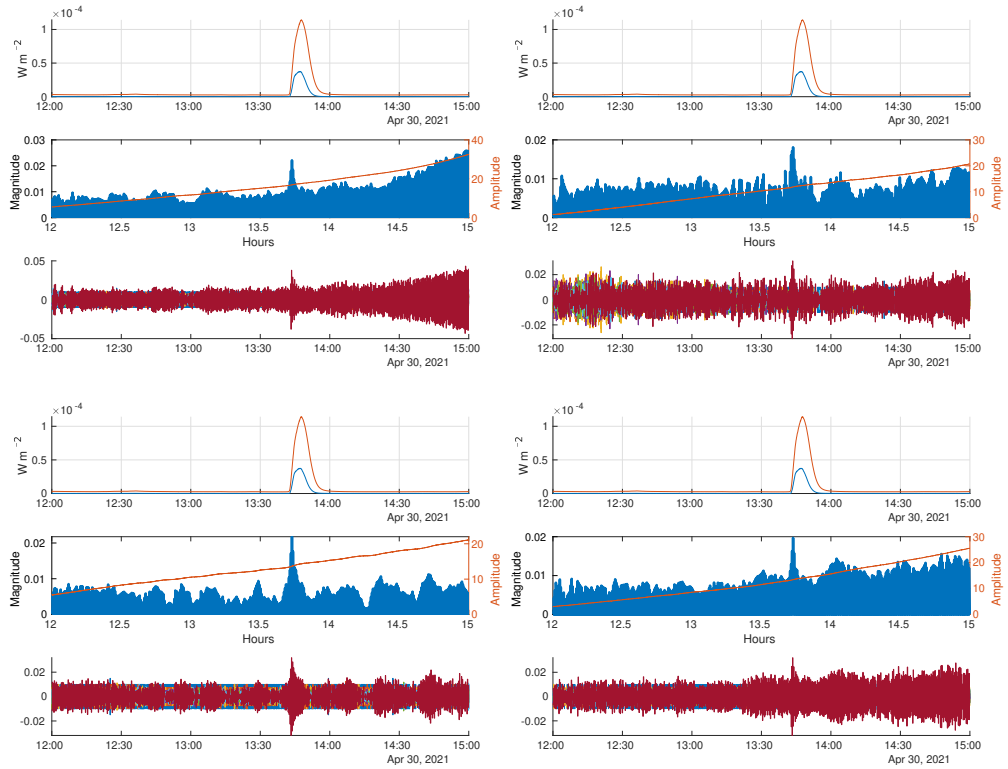


Figura 4.20: Gráfica representativa del evento solar del 30 de abril de 2022, registrado desde la estación UNPM. El análisis incluyó datos obtenidos de los satélites GPS 4, 7, 8 y 9, destacando la intensidad de la ráfagas solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

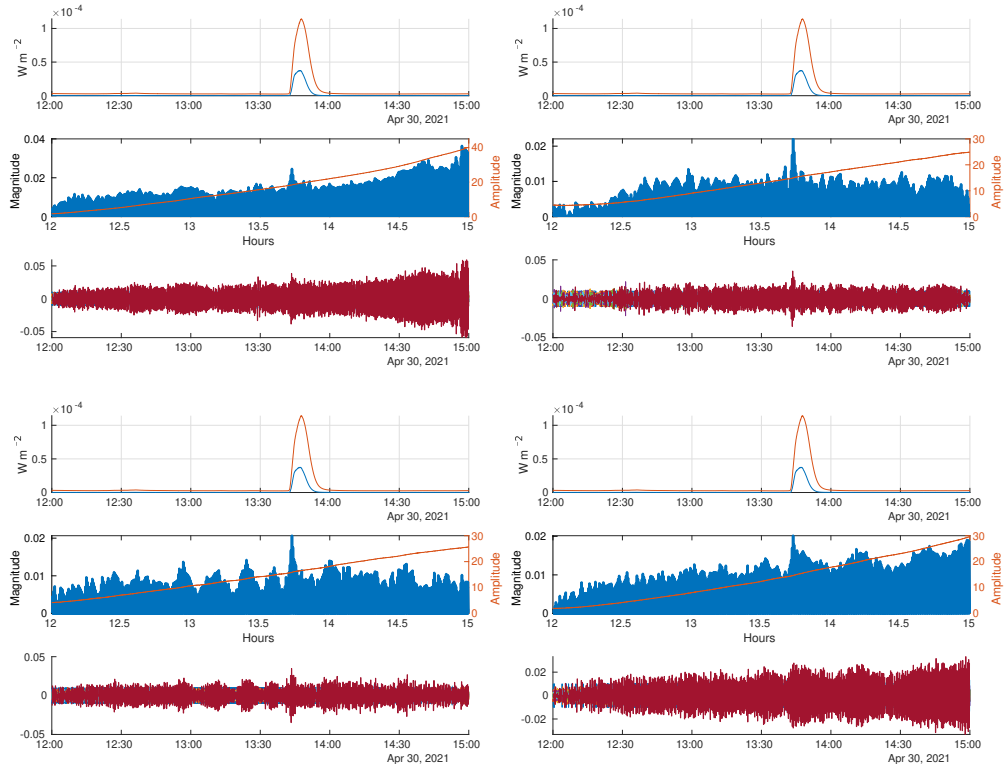


Figura 4.21: Gráfica representativa del evento solar del 30 de abril de 2022, observada desde la estación OXUM. El estudio se basó en los datos obtenidos de los satélites GPS 4, 7, 8 y 9, enfocándose en la intensidad de la ráfagas solar, las fluctuaciones en el TEC y su descomposición multiescala utilizando ondeletas.

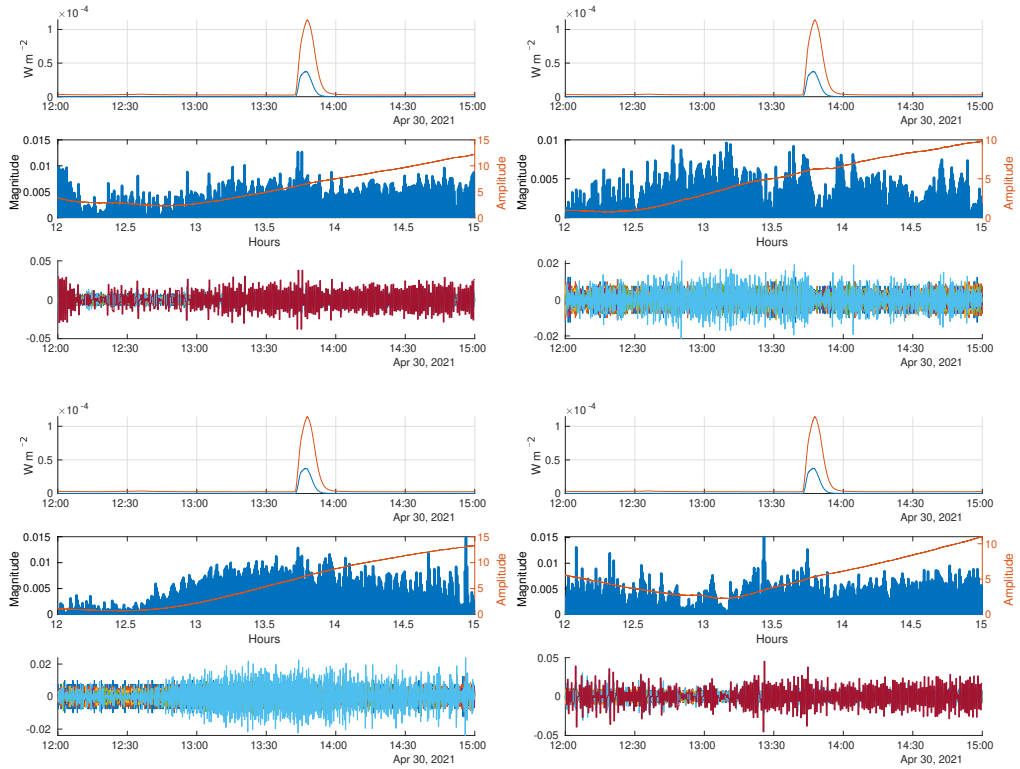


Figura 4.22: Gráfica representativa del evento solar del 30 de abril de 2022, registrada desde la estación SPIG. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 7, 8, 9 y 30, destacando la intensidad de la ráfagas solar, las variaciones en el contenido total de electrones y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

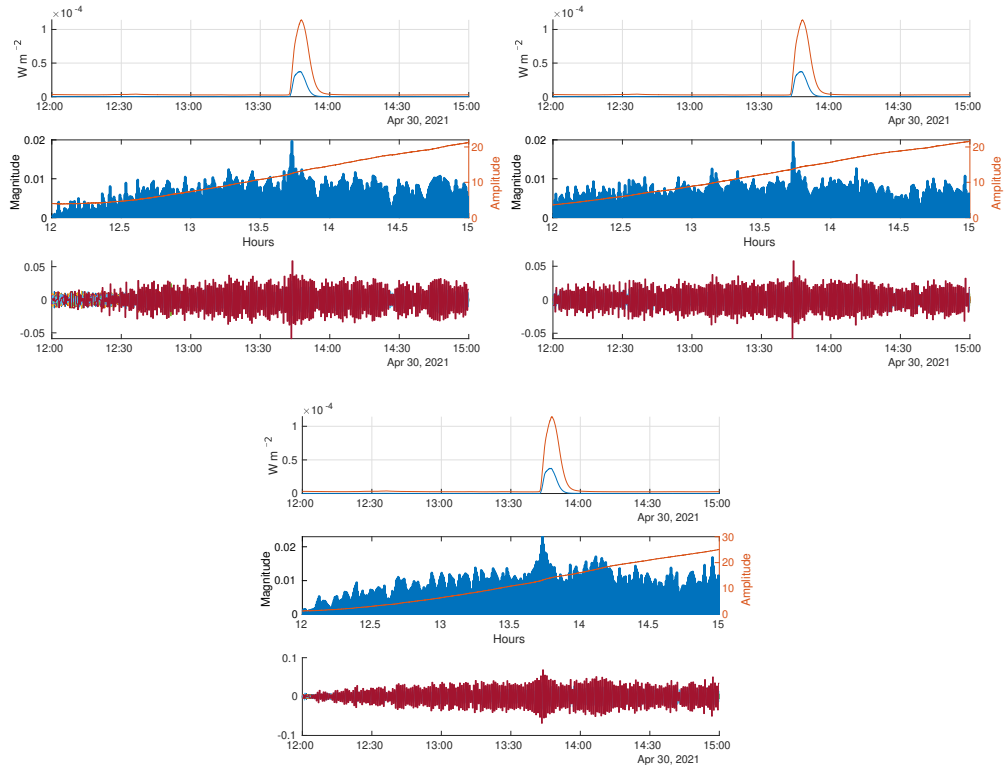


Figura 4.23: Gráfica representativa del evento solar del 30 de abril de 2022, observada desde la estación SSNX. El estudio se centró en los datos obtenidos de los satélites GPS 7, 8 y 9, poniendo énfasis en la intensidad de la ráfaga solar, las fluctuaciones en el TEC y su análisis multiescala mediante ondeletas.

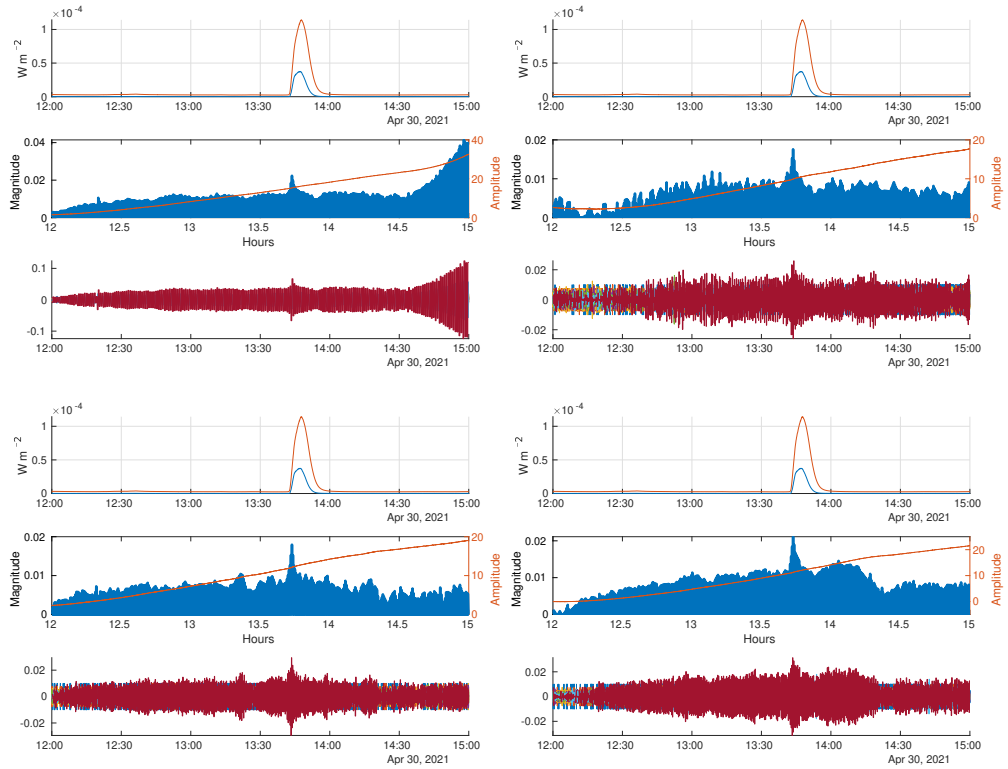


Figura 4.24: Gráfica representativa del evento solar del 30 de abril de 2022, registrada desde la estación UCOE. El análisis incluyó datos de los satélites GPS 4, 7, 8 y 9, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

4.1.5. 10 Mayo del 2022

El día 10 de mayo del 2022 se generó una ráfaga solar en la región AR13006, ubicada en S31 W10, ráfaga de tipo X1.5 que tuvo su mayor intensidad a las 13:55 UTC, teniendo un inicio y un fin a las 13:50 UTC y 13:59 UTC respectivamente. Durante este evento, todas las estaciones (UNPM, OXUM, SPIG, SSNX y UCOE) tuvieron alteraciones en la ionosfera durante el evento, y en todos los satélites es posible verificar las alteraciones de dicha ráfaga. El Satélite 14 mostró alteraciones al inicio de las ondeletas, pero dichas alteraciones se manifestaron en niveles inferiores al Nivel 7 de las ondeletas, mostrando la importancia de seleccionar el nivel de ondeletas más adecuado para nuestros datos (Figuras 4.27 - 4.30).

Este evento exhibió las alteraciones más significativas en los resultados de las ondeletas (Figura 4.25), mostrando una perturbación pronunciada con valores cercanos a 0.05 en el nivel de detalle 8. Considerando que el promedio para los otros eventos ronda 0.02, este evento experimentó una alteración más sustancial según las ondeletas. Una posible razón para estas perturbaciones pronunciadas en este evento podría ser la ubicación de la ráfaga solar en el disco solar, originándose en la parte central del Sol. Vale la pena mencionar que, en el caso del día tranquilo, obtuvimos valores máximos de las ondeletas inferiores a 0.01, lo que demuestra la correlación entre las perturbaciones inducidas por la ráfaga y los resultados de las ondeletas.

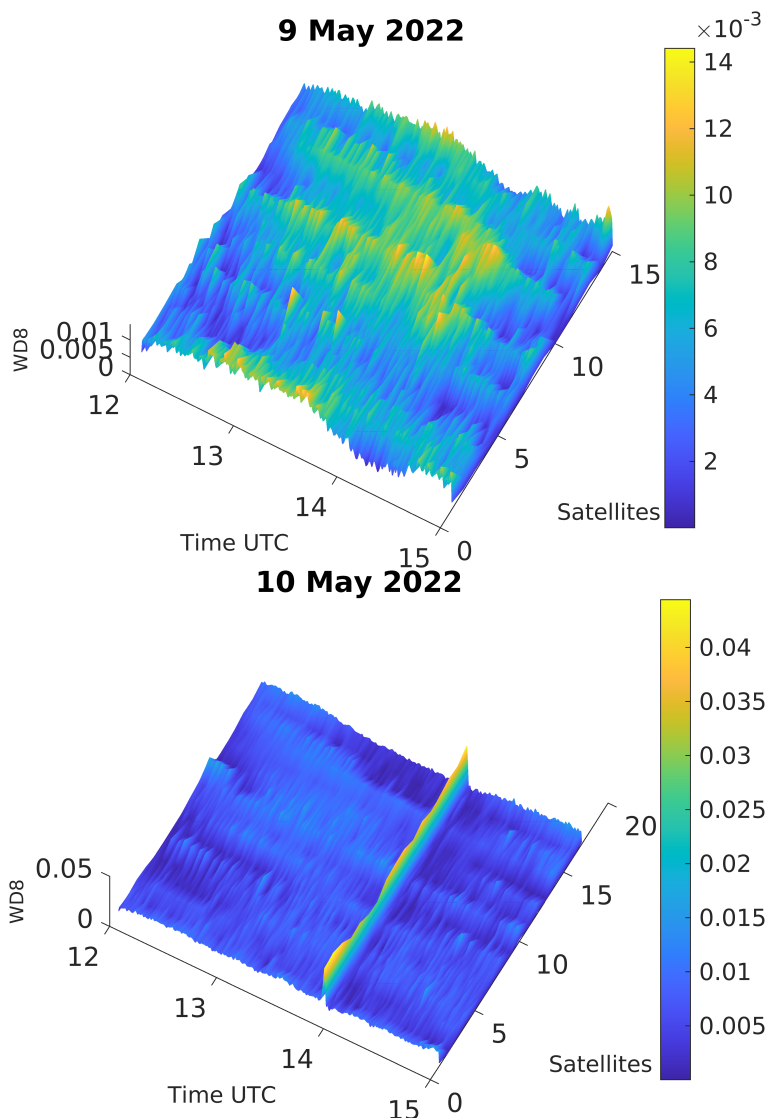


Figura 4.25: Comparación entre un día tranquilo (9 de mayo de 2022, imagen superior) y el evento del 10 de mayo de 2022 (imagen inferior). El evento del 10 de mayo muestra fluctuaciones más pronunciadas, con picos elevados en la escala de colores, indicando una perturbación ionosférica en comparación con el día previo. Se destacan las variaciones del VTEC en función del número de satélites, reflejando el impacto del evento.

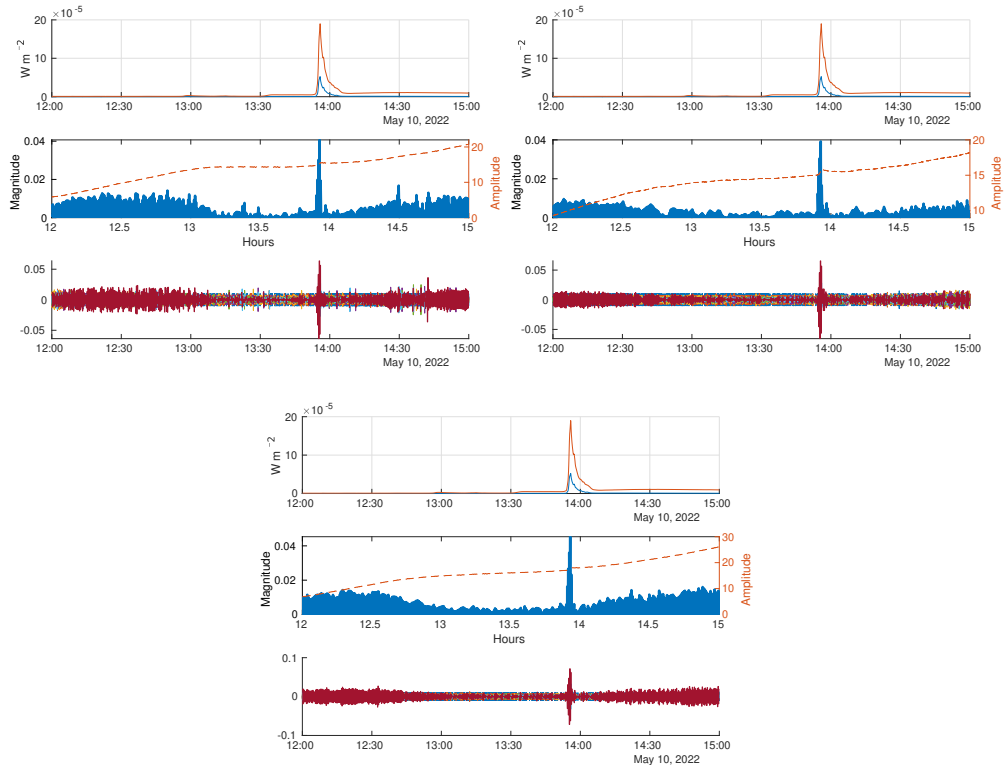


Figura 4.26: Gráfica representativa del evento solar del 10 de mayo de 2022, registrado desde la estación UNPM. El análisis se basó en los datos obtenidos de los satélites GPS 7, 8 y 9, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

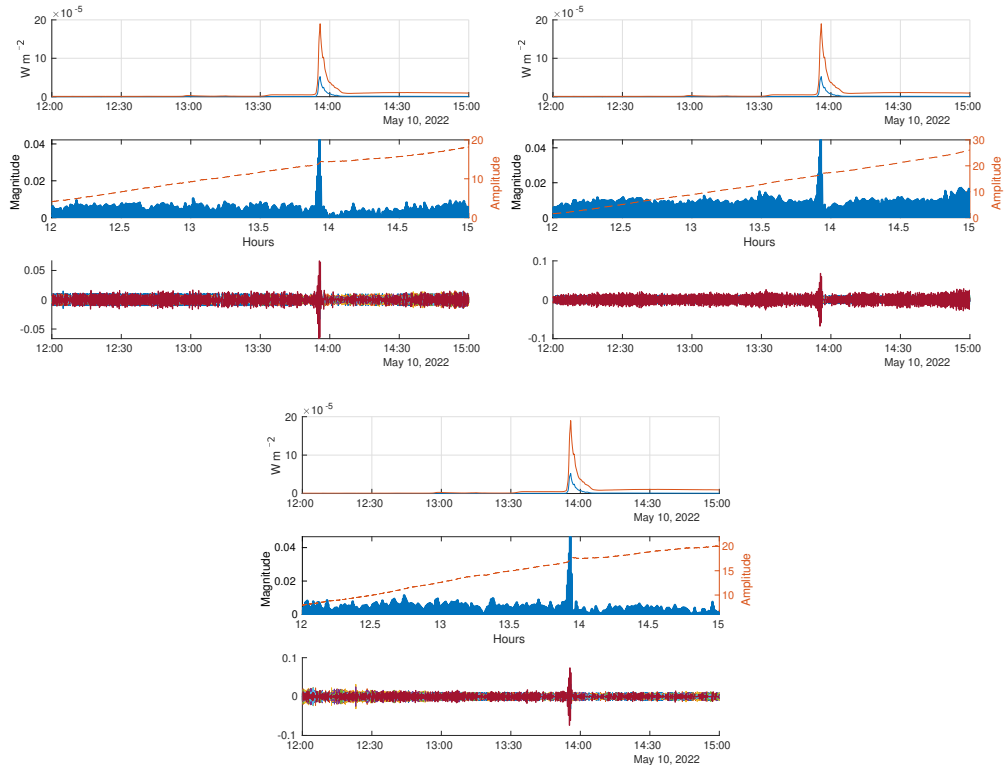


Figura 4.27: Gráfica representativa del evento solar del 10 de mayo de 2022, registrada desde la estación OXUM. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 8, 9 y 21, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el contenido total de electrones y su descomposición multiescala mediante ondeletas.

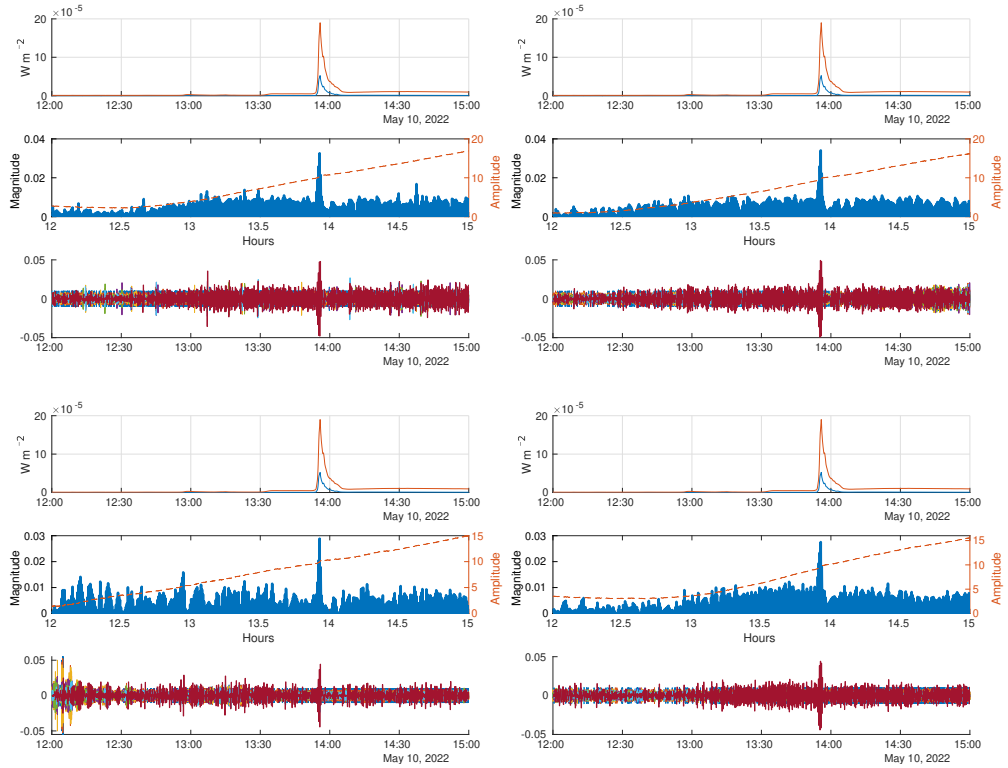


Figura 4.28: Gráfica representativa del evento solar del 10 de mayo de 2022, registrada desde la estación SPIG. Se analizaron datos obtenidos de los satélites GPS 7, 8, 14 y 30, respectivamente.

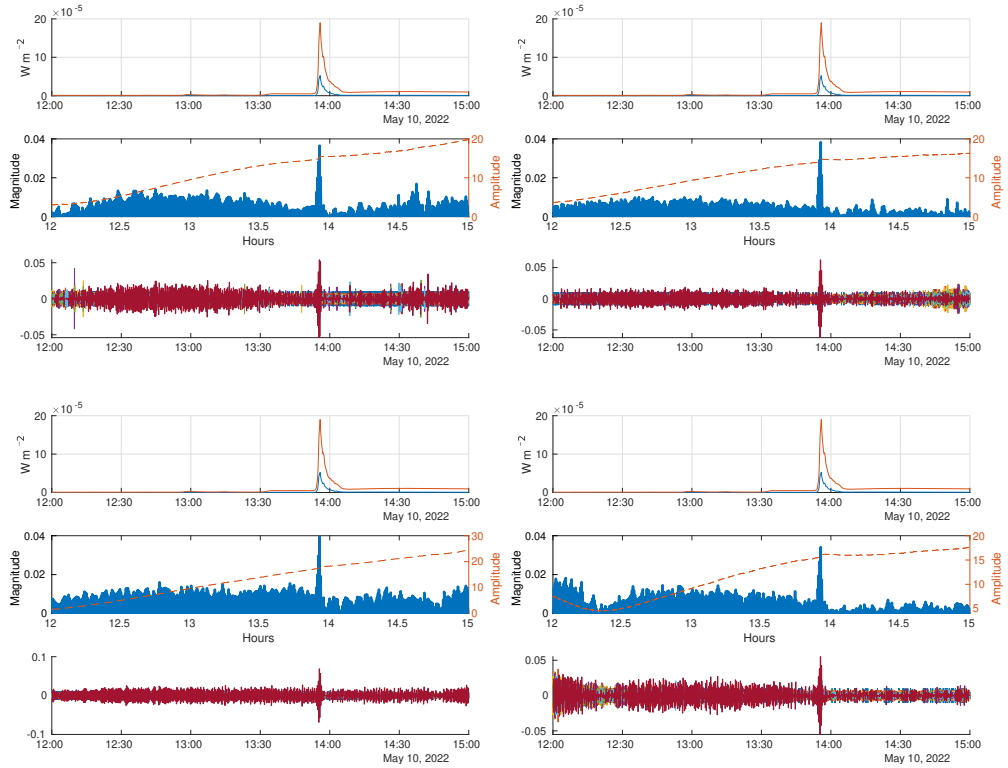


Figura 4.29: Gráfica representativa del evento solar del 10 de mayo de 2022, observado desde la estación SSNX. El análisis se realizó utilizando datos para los satélites 7, 8, 9 y 14, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición mediante ondeletas multiescala.

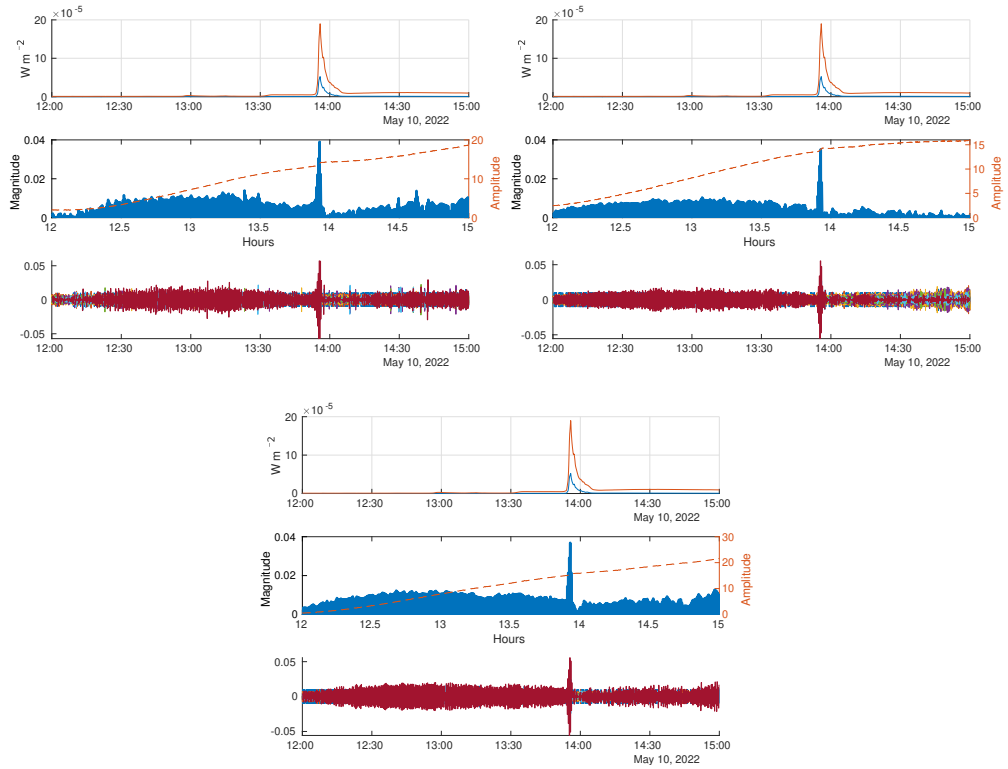


Figura 4.30: Gráfica representativa del evento solar del 10 de mayo de 2022, observado desde la estación UCOE. El análisis se realizó utilizando datos para los satélites 7, 8 y 9, destacando la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición mediante ondeletas multiescala.

4.1.6. 2 Octubre del 2022

El evento del 2 de octubre del 2022 inicio a las 19:53 UTC, tuvo su mayor intensidad a las 20:25 UTC y término a las 20:34 UTC, se originó en las coordenadas N16 W50 en la región AR13110. En los resultados de las ondeletas es posible apreciar el impacto de la ráfaga en cada uno de los satélites, para todas las estaciones. En algunos satélites se aprecian alteraciones en las ondeletas independientes al impacto de la ráfaga, sin embargo, los valores máximos de las ondeletas están justo en el momento en que sucede la ráfaga solar (Figuras 4.32 - 4.34).

Los resultados de las ondeletas para este evento revelaron alteraciones sutiles durante la ráfaga solar. A pesar de su sutileza, es factible discernir el momento en que la ráfaga impactó en la ionosfera y distinguir entre los resultados de un día tranquilo y un día afectado por las perturbaciones inducidas por la ráfaga (Figura 4.31).

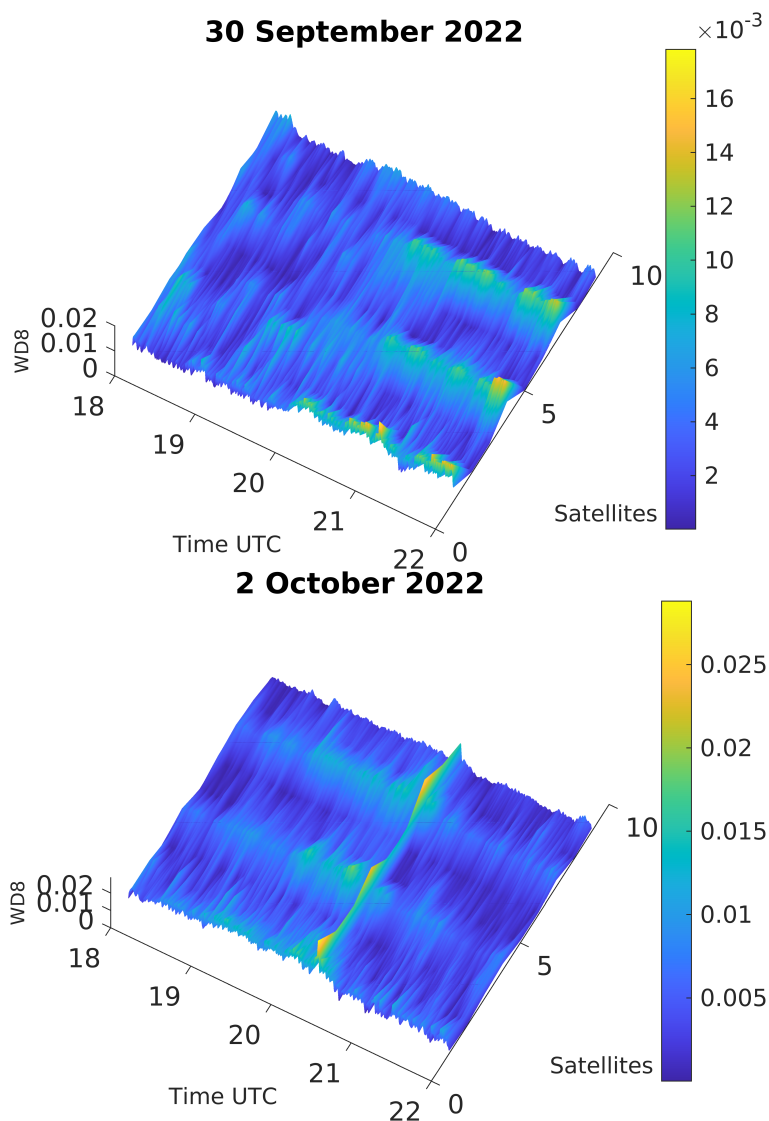


Figura 4.31: Comparación entre el día calmado (30 de septiembre de 2022, imagen superior) y el evento del 2 de octubre de 2022 (imagen inferior). El evento del 2 de octubre muestra fluctuaciones marcadas, con picos elevados en la escala de colores, lo que indica una perturbación ionosférica frente al comportamiento estable del día anterior. Las variaciones del VTEC en función del número de satélites destacan el impacto del evento.

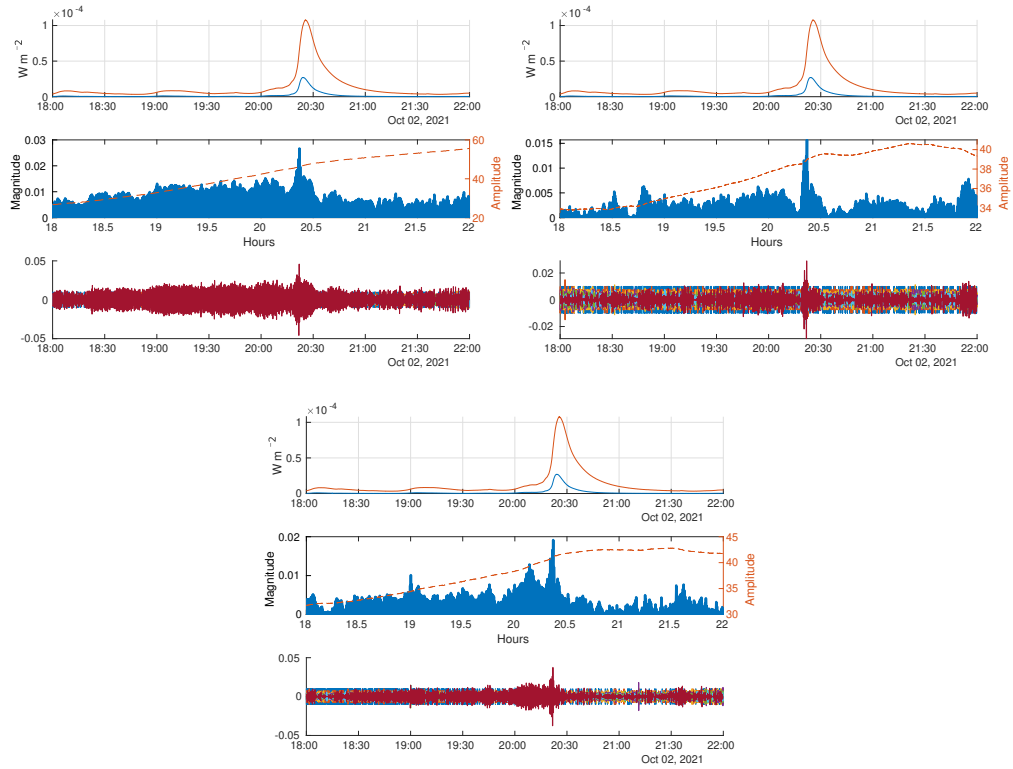


Figura 4.32: Representación gráfica del evento solar del 2 de octubre de 2022, registrado en la estación UTEO. Los datos analizados de los satélites GPS 10, 22 y 32 muestran la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones del contenido total de electrones y la descomposición de ondeletas multiescala, permitiendo una evaluación de las respuestas ionosféricas inducidas por el evento.

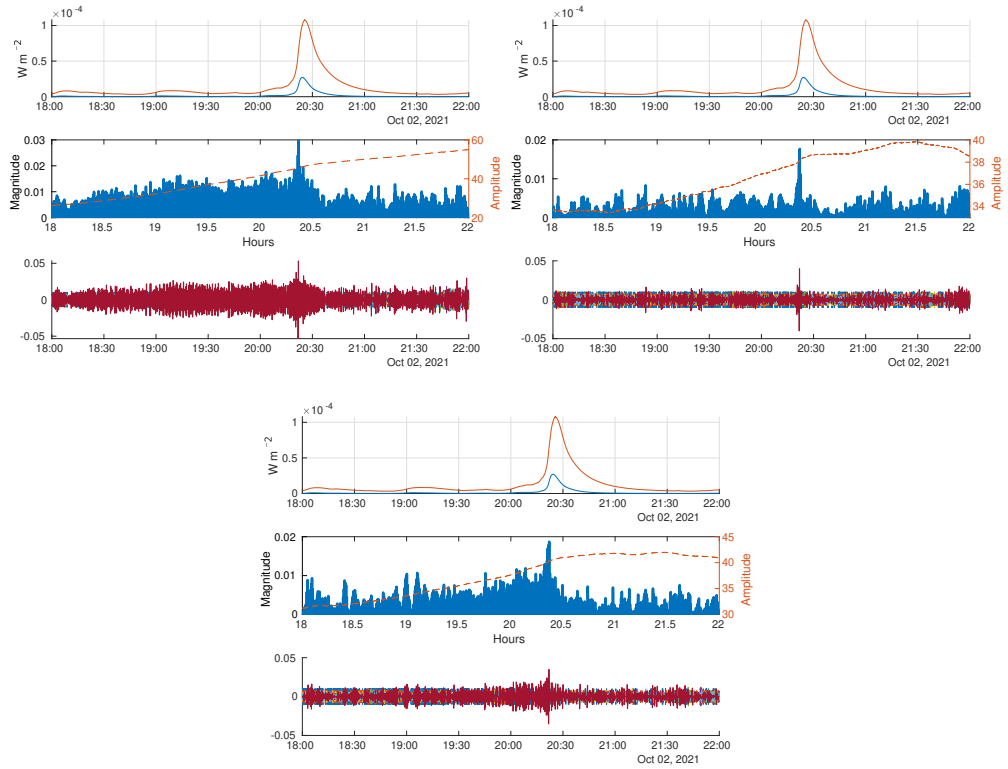


Figura 4.33: Representación gráfica del evento solar del 2 de octubre de 2022, registrado en la estación SSNX. Los datos correspondientes a los satélites GPS 10, 22 y 32 incluyen la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición de ondeletas multiescala.

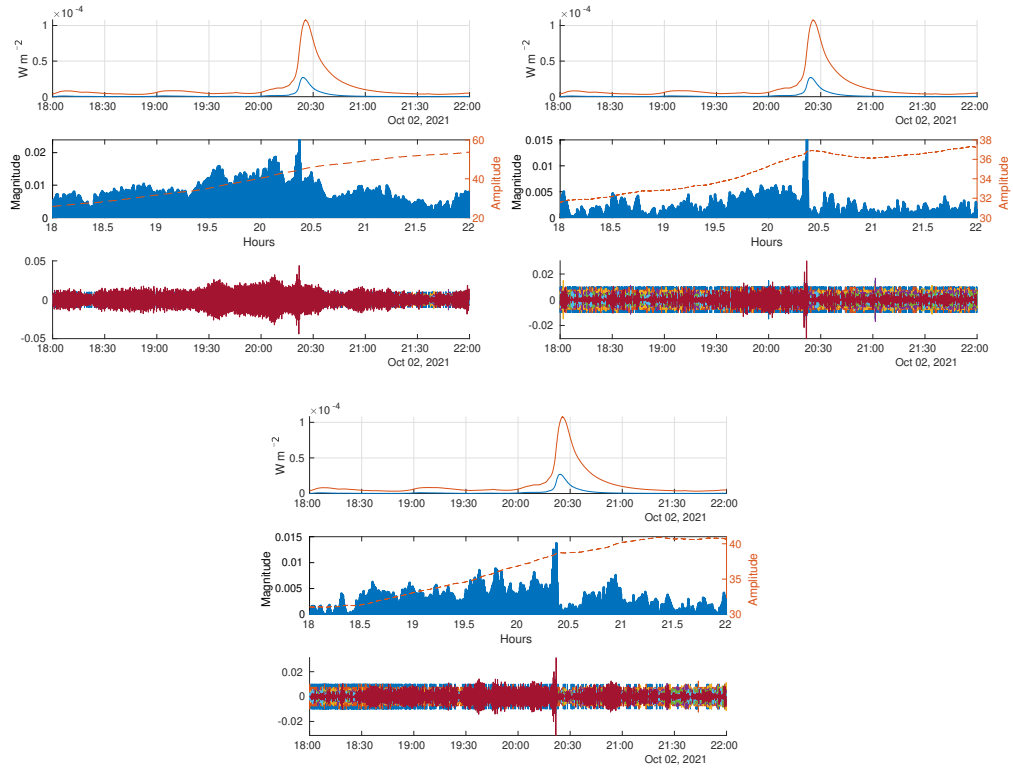


Figura 4.34: Gráfica representativa del evento solar del 2 de octubre de 2022, registrado desde la estación UCOE. Los datos obtenidos de los satélites GPS 10, 22 y 32 reflejan la intensidad de la ráfaga solar, las variaciones en el TEC y su descomposición de ondeletas multiescal.

Capítulo 5

Síntesis y Conclusiones

5.1. Síntesis

Se realizó un análisis de ráfagas solares y sus impactos en la ionosfera utilizando datos de GPS, considerando seis eventos de ráfagas solares tipo X, debido a los siguientes aspectos, características y ubicaciones variables en el disco solar entre 2021 y 2022. El estudio empleó transformaciones wavelet para examinar los valores de TEC derivados de satélites GPS, ofreciendo una perspectiva detallada temporal y espacial sobre las perturbaciones ionosféricas. La recopilación de datos de múltiples estaciones GPS y la aplicación del análisis de ondeletas permitieron detectar cambios sutiles en la densidad electrónica ionosférica causados por las ráfagas solares. Esta metodología identificó y caracterizó eficazmente estas perturbaciones, demostrando la utilidad del análisis de ondeletas en estudios del TEC.

Síntesis de eventos:

- **Evento del 3 de julio de 2021:** Originado en una región activa cerca del centro del disco solar, provocó importantes perturbaciones ionosféricas. El análisis de ondeletas reveló fluctuaciones pronunciadas de TEC en múltiples estaciones GNSS, confirmando el impacto del evento en la ionosfera.

- **Evento del 28 de octubre de 2021:** Originado en el borde este del disco solar, este evento causó perturbaciones ionosféricas sustanciales. Los resultados cuestionaron la suposición de que las ráfagas solares localizadas en el limbo solar tienen un impacto reducido en la ionosfera.

- **Evento del 30 de marzo de 2022:** Este evento, ubicado cerca del limbo oeste, demostró que la posición espacial de las ráfagas solares no necesariamente se correlaciona con su impacto ionosférico. El análisis mostró anomalías consistentes de TEC, sugiriendo que incluso las ráfagas en limbos solares pueden influir significativamente en la ionosfera.

- **Evento del 30 de abril de 2022:** El análisis de ondeletas de este evento, originado cerca del centro del disco solar, exhibió amplias perturbaciones ionosféricas. La consistencia de los resultados entre diferentes estaciones GNSS confirmó que la respuesta observada en el análisis de ondeletas se debía a la ráfaga solar.

- **Evento del 10 de mayo de 2022:** Este evento, originado en una región activa ligeramente al oeste del centro, también mostró fluctuaciones significativas de TEC. Los resultados resaltaron cómo el análisis de ondeletas permite detectar y caracterizar perturbaciones ionosféricas de manera consistente, sin importar la ubicación del evento en el disco solar.

- **Evento del 2 de octubre de 2022:** A pesar de estar ubicado cerca del limbo, este evento causó perturbaciones ionosféricas. Una vez más, el análisis de ondeletas demostró su capacidad para identificar los impactos de las ráfagas solares, independientemente de su origen en el disco solar.

Implicaciones

El análisis de estos eventos proporcionó varias conjeturas clave:

- **Eficacia del las ondeletas:** La aplicación de transformaciones wavelet demostró ser una técnica eficiente para detectar y analizar perturbaciones ionosféricas. La sensibilidad de la técnica a los cambios temporales en TEC permitió la detección de los impactos de las ráfagas solares.

- **Ubicación en el Disco Solar:** Los hallazgos desafiaron la suposición inicial de que las ráfagas solares ubicadas cerca del limbo solar tienen un impacto reducido en la ionosfera. Los resultados mostraron que las ráfagas en el limbo pueden inducir perturbaciones ionosféricas similares a los demás eventos, lo que requiere una reevaluación de su influencia percibida.

- **Consistencia entre Estaciones:** La detección consistente de anomalías de TEC en múltiples estaciones GNSS validó la confiabilidad de la metodología. La uniformidad de los resultados sugiere que las perturbaciones observadas no fueron debido a ruido del receptor, sino respuestas ionosféricas genuinas a la actividad solar.

- **Análisis Temporal y Espacial:** La capacidad para analizar tanto los aspectos temporales como espaciales de las perturbaciones ionosféricas proporcionó una mejor comprensión de cómo las ráfagas

solares afectan la ionosfera.

5.2. Conclusiones

Esta investigación ha revelado una limitación en los métodos convencionales de análisis del TEC, demostrando que estos no capturan adecuadamente las perturbaciones ionosféricas causadas por eventos solares esporádicos y de baja intensidad, especialmente cuando ocurren en el limbo solar.

Entre 2021 y 2022, se llevó a cabo un análisis de los eventos de ráfagas solares y sus efectos en la ionosfera. Este análisis utilizó una metodología que incluyó la aplicación de ondeletas a los valores de TEC. A través de este estudio, se investigaron seis eventos de tipo X que ocurrieron en diferentes fechas y ubicaciones en el sol. La exploración y análisis de los eventos de ráfagas solares y sus efectos en la ionosfera. Cada evento estudiado reveló patrones y características causadas por las ráfagas solares, lo que permite afirmar con mayor certeza que la aplicación de ondeletas muestra resultados favorables para el estudio de las ráfagas solares.

La implementación de una metodología de alta resolución permitió detectar y analizar estas perturbaciones, demostrando que incluso los eventos menores, comúnmente subestimados, generan efectos en la ionosfera. Este descubrimiento no sólo desafía las suposiciones existentes sobre la influencia de estos eventos menores, sino que también establece la necesidad imperiosa de utilizar enfoques más precisos y detallados en futuros estudios ionosféricos. En definitiva, este trabajo destaca que una mayor resolución en los datos no es simplemente un refinamiento técnico, sino un avance crucial para captar fenómenos que, de otro modo, pasarían inadvertidos, transformando

así nuestra comprensión de la interacción entre la actividad solar y la ionosfera.

La investigación confirmó que las ráfagas solares generan un impacto en la ionosfera, sin importar su ubicación en el disco solar. Incluso las ráfagas que se originan en el limbo solar, que anteriormente se consideraban que tenían un impacto menor, provocaron perturbaciones ionosféricas notables. Este hallazgo subraya la necesidad de considerar todas las ráfagas solares en los estudios de impacto ionosférico, independientemente de su ubicación en el disco solar. El estudio demostró que las transformaciones wavelet son altamente efectivas para detectar y analizar las alteraciones ionosféricas causadas por las ráfagas solares. La selección de los niveles de ondeletas 7 y 8 se identificó como la más adecuada para capturar con precisión estas alteraciones. La sensibilidad del método de ondeletas a los cambios temporales en los valores de TEC permitió una caracterización precisa de la respuesta ionosférica a la actividad solar.

La detección consistente de perturbaciones ionosféricas en múltiples estaciones GNSS y satélites reforzó la robustez de los resultados. La consistencia de las anomalías observadas en distintos conjuntos de datos confirmó que las alteraciones no fueron causadas por ruido del receptor ni por factores externos, sino que estaban directamente vinculadas a eventos de ráfagas solares. El análisis reveló que un intervalo de muestreo de 5 Hz es óptimo para este tipo de estudio, proporcionando resultados de alta calidad con un tiempo de procesamiento razonable. Este hallazgo es importante para investigaciones futuras, asegurando que se mantenga la calidad de los datos sin demandas computacionales excesivas. Para establecer la validez de las alteraciones detectadas, se realizaron comparaciones con días en los que no se registraron eventos solares, tormentas geomagnéticas o eyecciones de masa coronal. Este análisis comparativo demostró que las alteraciones observadas en los resultados están específica-

mente vinculadas a eventos de ráfagas solares, en lugar de patrones regulares o factores externos. Este enfoque validó la metodología y fortaleció la confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

El estudio se centró en eventos de ráfagas solares de tipo X, clasificados en el rango de X1 a X1.5. Se demostró que estos eventos tienen un impacto notable en la ionosfera terrestre. Incluso cuando estos eventos se originaron en ubicaciones consideradas menos favorables para su estudio, la metodología implementada permitió la detección y análisis de las alteraciones ionosféricas resultantes. El uso de ondeletas aplicados a los valores de TEC por satélite ha demostrado ser altamente sensible para detectar alteraciones ionosféricas. Este estudio identificó la selección adecuada de los niveles de ondeletas (7 y 8) como crucial para obtener una representación precisa de las alteraciones causadas por las ráfagas solares.

Este análisis exhaustivo ha proporcionado una comprensión sólida de cómo las ráfagas solares afectan la ionosfera, respaldada por evidencia empírica y un enfoque metodológico riguroso. El estudio ha destacado la importancia de considerar el espectro completo de eventos de ráfagas solares y sus impactos potenciales, independientemente de su ubicación en el disco solar. La sensibilidad de la metodología en detectar alteraciones y la validación comparativa de los resultados contribuyen a la confiabilidad y aplicabilidad de esta metodología en el estudio de eventos solares y sus impactos en la ionosfera terrestre. Los hallazgos ofrecen perspectivas valiosas para la investigación futura y aplicaciones prácticas en monitoreo y predicción del clima espacial.

Los hallazgos de esta investigación abren varias vías para estudios futuros. En primer lugar, expandir el conjunto de datos para incluir más eventos de ráfagas solares a lo largo de diferentes ciclos solares proporcionaría una comprensión más amplia de los patrones

e impactos de la actividad solar en la ionosfera. Además, la integración de otras técnicas analíticas junto con las ondeletas podría mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados.

La investigación futura también podría explorar el desarrollo de modelos predictivos para los impactos de las ráfagas solares en la ionosfera, utilizando los patrones y características identificados en este estudio. Dichos modelos serían invaluable para la predicción del clima espacial, ayudando a mitigar los efectos adversos de la actividad solar en las comunicaciones satelitales, sistemas de navegación y otras infraestructuras críticas.

Además, investigar la influencia de las ráfagas solares en diferentes regiones de la ionosfera, incluidas las áreas polares y ecuatoriales, proporcionaría una imagen más completa de los impactos globales de la actividad solar. Estudios colaborativos con instituciones de investigación internacionales y el uso de tecnologías satelitales avanzadas podrían mejorar aún más el alcance y la profundidad de la investigación futura en este campo. Continuando con los hallazgos de este estudio, la investigación futura puede contribuir a una infraestructura tecnológica más resiliente y bien preparada, capaz de enfrentar los desafíos planteados por la actividad solar.

Bibliografía

- Alves, D. B. M., [de Souza], E. M., y Gouveia, T. A. F. (2020). Correlation between ionospheric scintillation effects and gnss positioning over brazil during the last solar maximum (2012–2014). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 197:105019.
- Amerian, Y., Voosoghi, B., y Ghaffari, A. (2010). Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density in term of wavelets. *Journal of Aerospace Science and Technology*, 7(1):19–29.
- Araujo, E. (2005). Gps-derived total electron content response for the bastille day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station. *Geofísica internacional*, 44(2):211–218.
- Arras, C. y Wickert, J. (2018). Estimation of ionospheric sporadic e intensities from gps radio occultation measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 171:60–63.
- Ashby, N. (2002). Relativity and the global positioning system. *Physics Today*, 55(5):41–47.
- Ballatore, P. (2002). Effects of fast and slow solar wind on the correlations between interplanetary medium and geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A9):SMP–3.
- Bartels, J., Heck, N., y Johnston, H. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 44(4):411–454.
- Basavaiah, N. (2012). *Geomagnetism: solid earth and upper atmosphere perspectives*. Springer Science & Business Media.

- Baumgarten, Y., Psiaki, M. L., y Hysell, D. L. (2021). Navigation and ionosphere characterization using high-frequency signals: Models and solution concepts. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 68(2):353–367.
- Bravo, I. R. (2020). Interoperabilidad gnss usando la red geodésica activa.
- Briand, C., Clilverd, M., Inturi, S., y Cecconi, B. (2022). Role of hard x-ray emission in ionospheric d-layer disturbances during solar flares. *Earth, Planets and Space*, 74(1):41.
- Brunini, C., Meza, A., Azpilicueta, F., Van Zele, M. A., Gende, M., y Díaz, A. (2004). A new ionosphere monitoring technology based on gps. *Astrophysics and space science*, 290(3-4):415–429.
- Budden, K. G. (1988). *The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge University Press.
- Cahyadi, M. N., Anjasmara, I. M., Khomsin, Yusfania, M., Sari, A., Saputra, F. A., Muslim, B., y Rwabudandi, I. (2018). Coseismic ionospheric disturbances (cid) after west sumatra earthquake 2016 using gnss-tec and possibility of early warning system during the event. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1987, page 020019. AIP Publishing LLC.
- Chen, Y., Kong, R., y Kong, L. (2020). 14 - applications of artificial intelligence in astronomical big data. In Kong, L., Huang, T., Zhu, Y., y Yu, S., editors, *Big Data in Astronomy*, pages 347–375. Elsevier.
- Colom, R. J., Gadea, R., Sebastia, A., Martínez, M., Ballester, F., y Herrero, V. (2001). Implementación de la transformada wavelet discreta 2d con filtros no separables. *presentado en I Jornadas sobre Computación Reconfigurable y Aplicaciones*. Alicante, España.
- Corbacho, R. (2018). Estudio de las perturbaciones ionosféricas viajeras sub – ecuatoriales.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA.

- de Abreu, A., Correia, E., Denardini, C., de Jesus, R., Venkatesh, K., Roberto, M., Abalde, J., Fagundes, P., Bolzan, M., y Gende, M. (2022). Ionospheric gps-tec responses from equatorial region to the eia crest in the south american sector under intense space weather conditions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 227:105801.
- Dugassa, T., Habarulema, J. B., y Nigussie, M. (2019). Longitudinal variability of occurrence of ionospheric irregularities over the american, african and indian regions during geomagnetic storms. *Advances in Space Research*, 63(8):2609–2622.
- Eftaxiadis, K., Cervera, M. A., y Thomas, R. M. (1999). A global positioning system receiver for monitoring ionospheric total electron content. Technical report, DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION CANBERRA (AUSTRALIA).
- Fragoso, S. B. (2015). Comportamiento de la ionósfera en la zona centro de la república mexicana. Master's thesis, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- Gonzalez, W., Joselyn, J.-A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B., y Vasyliunas, V. (1994a). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4):5771–5792.
- Gonzalez, W., Joselyn, J.-A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B., y Vasyliunas, V. (1994b). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4):5771–5792.
- Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., y De Gonzalez, A. L. C. (1999). Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, 88(3-4):529–562.
- Groves, P. D. (2015). Principles of gnss, inertial, and multisensor integrated navigation systems, [book review]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 30(2):26–27.
- Haines, C., Owens, M., Barnard, L., Lockwood, M., y Ruffenach, A. (2019). The variation of geomagnetic storm duration with intensity. *Solar physics*, 294(11):154.
- Haldoupis, C. (2012). Midlatitude sporadic e. a typical paradigm of atmosphere-ionosphere coupling. *Space science reviews*, 168:441–461.

- Haldoupis, C., Haralambous, H., Meek, C., y Mathews, J. D. (2023). Understanding the diurnal cycle of midlatitude sporadic e. the role of metal atoms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(4):e2023JA031336. e2023JA031336 2023JA031336.
- Han, Y., Wang, L., Fu, W., Zhou, H., Li, T., y Chen, R. (2021). Machine learning-based short-term gps tec forecasting during high solar activity and magnetic storm periods. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15:115–126.
- Hargreaves, J. (1995). *The solar-terrestrial environment*. Atmospheric and space science series. Cambridge University Press.
- 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.
- He, L., Guo, C., Yue, Q., Zhang, S., Qin, Z., y Zhang, J. (2023). A novel ionospheric disturbance index to evaluate the global effect on beidou navigation satellite system signal caused by the moderate geomagnetic storm on may 12, 2021. *Sensors*, 23(3):1183.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Hospodka, J. y Matějovíe, M. (2022). Verification of influence of the solar flare from september 2017 to ads-b nac parameter. *Transportation Research Proceedings*, 65:52–59. 11th International Conference on Air Transport – INAIR 2022, Returning to the Skies.
- Howard, T. (2011). *Coronal mass ejections: An introduction*, volume 376. Springer Science & Business Media.
- Jin, S., Cardellach, E., y Xie, F. (2014). *Introduction to GNSS*, pages 3–16. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Klobuchar, J. A. (1991). Ionospheric effect on gps. *GPS world*, 2(4):48–51.
- Koskinen, H. (2011). *Physics of space storms: From the solar surface to the Earth*. Springer Science & Business Media.

- Krypiak-Gregorczyk, A. (2019). Ionosphere response to three extreme events occurring near spring equinox in 2012, 2013 and 2015, observed by regional gnss-tec model. *Journal of Geodesy*, 93(7):931–951.
- Lakhina, G. S. y Tsurutani, B. T. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3:1–11.
- Lazzús, J. A., Salfate, I., y Vega-Jorquera, P. (2022). Intense geomagnetic storms in the maximum phase of solar cycle 24 observed from a low-latitude ground station. *Geofísica internacional*, 61(4):267–286.
- Li, G., Ning, B., Zhao, X., Sun, W., Hu, L., Xie, H., y Ajith, K. K. (2019). Low latitude ionospheric tec oscillations associated with periodic changes in imf bz polarity. *Geophysical Research Letters*, 46(16):9379–9387.
- Li, H., Wang, J.-S., Chen, Z., Xie, L., Li, F., y Zheng, T. (2020). The contribution of geomagnetic activity to ionospheric fof2 trends at different phases of the solar cycle by swm. *Atmosphere*, 11(6).
- Li, W., Yue, J., Yang, Y., He, C., Hu, A., y Zhang, K. (2018). Ionospheric and thermospheric responses to the recent strong solar flares on 6 september 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(10):8865–8883.
- Lopez-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E. A., y Cruz-Abeyro, J. A. L. (2015). Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms. *Advances in Space Research*, 55(2):586–596.
- Mallat, S. G. (1989a). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(7):674–693.
- Mallat, S. G. (1989b). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(7):674–693.
- Memarzadeh, Y. (2009). *Ionospheric modeling for precise GNSS applications*. Citeseer.

- Mendes Jr, O., Domingues, M. O., Da Costa, A. M., y De Gonzalez, A. L. C. (2005). Wavelet analysis applied to magnetograms: singularity detections related to geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(17-18):1827–1836.
- Navia, C. E., de Oliveira, M. N., y Augusto, C. R. (2018). *The highest geomagnetic storms of the solar cycle observed at ground level*. IntechOpen London.
- Nayak, K., López-Urías, C., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Guzmán-Acevedo, G. M., y Trejo-Soto, M. E. (2023a). Ionospheric total electron content (tec) anomalies as earthquake precursors: unveiling the geophysical connection leading to the 2023 moroccan 6.8 mw earthquake. *Geosciences*, 13(11):319.
- Nayak, K., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Zavala, J. L. C., Urias, C. L., Soto, M. E. T., y Aggarwal, S. P. (2023b). A combined approach using b-value and ionospheric gps-tec for large earthquake precursor detection: A case study for the colima earthquake of 7.7 mw, mexico. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 58(4):515–538.
- Niknam, K. y Simpson, J. J. (2021). A review of grid-based, time-domain modeling of electromagnetic wave propagation involving the ionosphere. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 6:214–228.
- Nykiel, G., Zanimonskiy, Y., Koloskov, A., y Figurski, M. (2019). The possibility of estimating the height of the ionospheric inhomogeneities based on tec variations maps obtained from dense gps network. *Advances in Space Research*, 64(10):2002–2011.
- Ogawa, T., Nishitani, N., Otsuka, Y., Shiokawa, K., Tsugawa, T., y Hosokawa, K. (2009). Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the superdarn hokkaido radar, all-sky imager, and gps network and their relation to concurrent sporadic e irregularities. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A3).
- Oljira, A. (2023). A study of solar flares and geomagnetic storms impact on total electron content over high-latitude region during july- november 2021: The case of tromso station. *Advances in Space Research*, 72(9):3868–3881.
- Palacios, J. C. (2010). Cálculo del contenido total de electrones (tec) en la ionosfera colombiana mediante la utilización de una red de estaciones de rastreo satelital (reico). *Departamento de Física y Química*.

- Pappoe, J. A., Yoshikawa, A., Kandil, A., y Mahrous, A. (2023). A machine learning approach combined with wavelet analysis for automatic detection of pc5 geomagnetic pulsations observed at geostationary orbits. *Advances in Space Research*.
- Pavlov, A. (2014). Photochemistry of ions at d-region altitudes of the ionosphere: A review. *Surveys in Geophysics*, 35:259–334.
- Petrovay, K. (2020). Solar cycle prediction. *Living Reviews in Solar Physics*, 17(1):2.
- Pick, M. (2002). Coronal mass ejections to the interplanetary medium. In Wang, H. y Xu, R., editors, *Solar-terrestrial Magnetic Activity and Space Environment*, volume 14 of *COSPAR Colloquia Series*, pages 149–156. Pergamon.
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M., García, L., Guinea, D., y Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (gps): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. *ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga*.
- Qian, L., Wang, W., Burns, A. G., Chamberlin, P. C., Coster, A., Zhang, S.-R., y Solomon, S. C. (2019). Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 september 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.
- Rao, S., Chakraborty, M., Kumar, S., y Singh, A. (2019). Low-latitude ionospheric response from gps, iri and tie-gcm tec to solar cycle 24. *Astrophysics and Space Science*, 364(12):216.
- Ratcliffe, J. A. et al. (1972). *An introduction to ionosphere and magnetosphere*. CUP Archive.
- Rishbeth, H. y Garriott, O. K. (1969). Introduction to ionospheric physics. *Introduction to ionospheric physics*.
- Rodger, A. y Jarvis, M. (2000). Ionospheric research 50 years ago, today and tomorrow. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(17-18):1629–1645.
- Rodríguez, M. (2017). Estudio de perturbaciones ionosféricas a través del contenido total de electrones en europa meridional.

- Rostoker, G. (1972). Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics*, 10(4):935–950.
- Sánchez Durán, A. (2018). *Análisis para la implementación del sistema EGNOS en aeronaves no tripuladas para aplicaciones de validación de procedimientos SBAS*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València.
- Sardon, E., Rius, A., y Zarraoa, N. (1993). Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del sistema de posicionamiento global.
- Schunk, R. y Nagy, A. (2000). *Ionospheres: Physics, plasma physics, chemistry*. cambridge univ.
- Sharma, G., Mohanty, S., Kannaujiya, S., et al. (2017). Ionospheric tec modelling for earthquakes precursors from gnss data. *Quaternary International*, 462:65–74.
- Sieradzki, R. y Paziewski, J. (2019). Gnss-based analysis of high latitude ionospheric response on a sequence of geomagnetic storms performed with roti and a new relative stec indicator. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 9:A5.
- Sifuzzaman, M., Islam, M. R., y Ali, M. Z. (2009). Application of wavelet transform and its advantages compared to fourier transform.
- Sohn, K., Park, B., y Kee, C. (2009). Efficient ionospheric model using wavelet for geomagnetic storm. In *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, pages 718–723.
- Tariq, M. A., Shah, M., Hernández-Pajares, M., y Iqbal, T. (2019). Pre-earthquake ionospheric anomalies before three major earthquakes by gps-tec and gim-tec data during 2015–2017. *Advances in Space Research*, 63(7):2088–2099.
- Tascione, T. F. (1988). *Introduction to the space environment*.
- Thai GNSS and Space Weather Information Data Center (2023). http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243, 22 de Enero de 2023.
- Torrence, C. y Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1):61–78.

- Turel, N. y Arikan, F. (2010). Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content. *Radio Science*, 45(06):1–10.
- Ugalde, C. L. (2013). *INTERFERENCIAS SATELITALES Y PERTURBACIONES IONOSFERICAS QUE IMPACTAN LA CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES DEL RADIOTELESCOPIO MEXART*. PhD thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Union, I. T. y Bureau, I. T. U. R. (1998). *Handbook, the Ionosphere and Its Effects on Radiowave Propagation: A Guide with Background to ITU-R Procedures for Radioplanners and Users*. International Telecommunication Union Radiocommunication Bureau.
- Wang, W., Dang, T., Lei, J., Zhang, S., Zhang, B., y Burns, A. (2019). Physical processes driving the response of the f2 region ionosphere to the 21 august 2017 solar eclipse at millstone hill. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(4):2978–2991.
- Wang, X., Chen, Y., Toth, G., Manchester, W. B., Gombosi, T. I., Hero, A. O., y Liu, Y. (2020). Predicting solar flares with machine learning: Investigating solar cycle dependence. *The Astrophysical Journal*, 895(1):3.
- Yang, Y.-M., Komanduru, A., y Garrison, J. (2023). Detection of atmospheric-ionospheric disturbances in tec time series from large gnss networks using wavelet coherence. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16:5154–5172.
- Yeeram, T. (2019). The solar wind-magnetosphere coupling and daytime disturbance electric fields in equatorial ionosphere during consecutive recurrent geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Zhang, R., Le, H., Li, W., Ma, H., Yang, Y., Huang, H., y Liu, L. (2020). Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 june 2020 solar eclipse. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(12):e2020JA028450.
- Zolesi, B. y Cander, L. R. (2014). *The General Structure of the Ionosphere*, pages 11–48. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.