

**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 MAPAS IONOSFÉRICOS DURANTE
TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS INTENSAS
($D_{st} \leq -100nT$) EN EL PERIODO 2011-2018**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA:

CHARBETH LÓPEZ URIAS

DIRECTORES DE TESIS:

DR. G. ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA

DRA. REBECA LÓPEZ MONTES

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO ENERO DEL 2020

Índice general

| | |
|---|----------|
| Índice de figuras | IV |
| Índice de tablas | VII |
| Agradecimientos | VIII |
| Resumen | IX |
| Abstract | X |
| Capítulo I | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Justificación | 4 |
| 1.4. Hipótesis | 5 |
| 1.5. Antecedentes | 6 |
| Capítulo II | 7 |
| 2. Marco Teórico | 8 |
| 2.1. Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) | 8 |
| 2.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) | 8 |
| 2.2. Ionosfera | 13 |
| 2.2.1. Estructura de la ionosfera | 14 |
| 2.2.2. Perturbaciones ionosféricas | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.3. Contenido Total de Electrones (TEC) | 23 |
| 2.3. Campo geomagnético | 27 |
| 2.3.1. Tormentas geomagnéticas | 27 |
| 2.3.2. Índice Dst | 28 |
| 2.4. Fenómenos relación Sol-Tierra | 30 |
| 2.4.1. Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) y Ráfagas solares | 30 |
| Capítulo III | 32 |
| 3. Materiales y métodos | 32 |
| 3.1. Metodología | 32 |
| 3.2. Área de estudio | 34 |
| 3.3. Cálculo del TEC | 35 |
| 3.4. Función de densidad de probabilidad (PDF) | 37 |
| Capítulo IV | 40 |
| 4. Resultados y análisis | 40 |
| 4.1. Evento 1 (6 de agosto 2011) | 48 |
| 4.2. Evento 2 (26 de septiembre 2011) | 49 |
| 4.3. Evento 3 (25 de octubre 2011) | 51 |
| 4.4. Evento 4 (9 de marzo 2012) | 53 |
| 4.5. Evento 5 (24 de abril 2012) | 55 |
| 4.6. Evento 6 (15 de julio 2012) | 57 |
| 4.7. Evento 7 (1 de octubre 2012) | 59 |
| 4.8. Evento 8 (9 de octubre 2012) | 61 |
| 4.9. Evento 9 (14 de noviembre 2012) | 63 |
| 4.10. Evento 10 (17 de marzo 2013) | 65 |
| 4.11. Evento 11 (1 de junio 2013) | 67 |
| 4.12. Evento 12 (29 de junio 2013) | 69 |
| 4.13. Evento 13 (19 de febrero 2014) | 71 |
| 4.14. Evento 14 (17 de marzo 2015) | 73 |
| 4.15. Evento 15 (23 de junio 2015) | 75 |
| 4.16. Evento 16 (7 de octubre 2015) | 77 |
| 4.17. Evento 17 (20 de diciembre 2015) | 79 |
| 4.18. Evento 18 (1 de enero 2016) | 81 |

| | |
|--|------------|
| | III |
| 4.19. Evento 19 (13 de octubre 2016) | 83 |
| 4.20. Evento 20 (28 de mayo 2017) | 85 |
| 4.21. Evento 21 (8 de septiembre 2017) | 87 |
| 4.22. Evento 22 (26 de agosto 2018) | 89 |
| Capítulo V | 92 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones | 92 |
| Bibliografía | 96 |
| Anexos | 102 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Perfil ionosférico por Anderson y Fuller-Rowell (1999). | 15 |
| 2.2. | Perfil ionosférico donde se incluye a la capa C por Davies (1990). | 18 |
| 2.3. | Estructura vertical de la ionosfera para el día y la noche en alta y baja actividad solar en latitudes medias por Hargreaves (1992) | 20 |
| 2.4. | TEC inclinado desde un satélite a un receptor (Cortesía de http://iono-gnss.kmitl.ac.th/). | 24 |
| 2.5. | Ejemplos del STEC calculado usando datos GPS por Arora et al. (2016). | 26 |
| 2.6. | Contenido Total de Electrones Vertical (Cortesía de http://iono-gnss.kmitl.ac.th/). | 27 |
| 3.1. | Área de estudio. | 34 |
| 4.1. | Ciclo solar 24. | 42 |
| 4.2. | Evento 1 (6 de agosto 2011). | 48 |
| 4.3. | PDF Evento 1 (6 de agosto 2011). | 49 |
| 4.4. | Evento 2 (26 de septiembre 2011). | 50 |
| 4.5. | PDF Evento 2 (26 de septiembre 2011). | 51 |
| 4.6. | Evento 3 (25 de octubre 2011). | 52 |
| 4.7. | PDF Evento 3 (25 de octubre 2011). | 53 |
| 4.8. | Evento 4 (9 de marzo 2012). | 54 |
| 4.9. | PDF Evento 4 (9 de marzo 2012). | 55 |
| 4.10. | Evento 5 (24 de abril 2012). | 56 |
| 4.11. | PDF Evento 5 (24 de abril 2012). | 57 |

| | |
|---|-----|
| 4.12. Evento 6 (15 de julio 2012). | 58 |
| 4.13. PDF Evento 6 (15 de julio 2012). | 59 |
| 4.14. Evento 7 (1 de octubre 2012). | 60 |
| 4.15. PDF Evento 7 (1 de octubre 2012). | 61 |
| 4.16. Evento 8 (9 de octubre 2012). | 62 |
| 4.17. PDF Evento 8 (9 de octubre 2012). | 63 |
| 4.18. Evento 9 (14 de noviembre 2012). | 64 |
| 4.19. PDF Evento 9 (14 de noviembre 2012). | 65 |
| 4.20. Evento 10 (17 de marzo 2013). | 66 |
| 4.21. PDF Evento 10 (17 de marzo 2013). | 67 |
| 4.22. Evento 11 (1 de junio 2013). | 68 |
| 4.23. PDF Evento 11 (1 de junio 2013). | 69 |
| 4.24. Evento 12 (29 de junio 2013). | 70 |
| 4.25. PDF Evento 12 (29 de junio 2013). | 71 |
| 4.26. Evento 13 (19 de febrero 2014). | 72 |
| 4.27. PDF Evento 13 (19 de febrero 2014). | 73 |
| 4.28. Evento 14 (17 de marzo 2015). | 74 |
| 4.29. PDF Evento 14 (17 de marzo 2015). | 75 |
| 4.30. Evento 15 (23 de junio 2015). | 76 |
| 4.31. PDF Evento 15 (23 de junio 2015). | 77 |
| 4.32. Evento 16 (7 de octubre 2015). | 78 |
| 4.33. PDF Evento 16 (7 de octubre 2015). | 79 |
| 4.34. Evento 17 (20 de diciembre 2015). | 80 |
| 4.35. PDF Evento 17 (20 de diciembre 2015). | 81 |
| 4.36. Evento 18 (1 de enero 2016). | 82 |
| 4.37. PDF Evento 18 (1 de enero 2016). | 83 |
| 4.38. Evento 19 (13 de octubre 2016). | 84 |
| 4.39. PDF Evento 19 (13 de octubre 2016). | 85 |
| 4.40. Evento 20 (28 de mayo 2017). | 86 |
| 4.41. PDF Evento 20 (28 de mayo 2017). | 87 |
| 4.42. Evento 21 (8 de septiembre 2017). | 88 |
| 4.43. PDF Evento 21 (8 de septiembre 2017). | 89 |
| 4.44. Evento 22 (26 de agosto 2018). | 90 |
| 4.45. PDF Evento 22 (26 de agosto 2018). | 91 |
| 5.1. Mapas ionosféricos del Evento 1 | 103 |

| | |
|--|-----|
| 5.2. Mapas ionosféricos del Evento 2 | 103 |
| 5.3. Mapas ionosféricos del Evento 3 | 104 |
| 5.4. Mapas ionosféricos del Evento 4 | 104 |
| 5.5. Mapas ionosféricos del Evento 5 | 105 |
| 5.6. Mapas ionosféricos del Evento 6 | 105 |
| 5.7. Mapas ionosféricos del Evento 7 | 106 |
| 5.8. Mapas ionosféricos del Evento 8 | 106 |
| 5.9. Mapas ionosféricos del Evento 9 | 107 |
| 5.10. Mapas ionosféricos del Evento 10 | 107 |
| 5.11. Mapas ionosféricos del Evento 11 | 108 |
| 5.12. Mapas ionosféricos del Evento 12 | 108 |
| 5.13. Mapas ionosféricos del Evento 13 | 109 |
| 5.14. Mapas ionosféricos del Evento 14 | 109 |
| 5.15. Mapas ionosféricos del Evento 15 | 110 |
| 5.16. Mapas ionosféricos del Evento 16 | 110 |
| 5.17. Mapas ionosféricos del Evento 17 | 111 |
| 5.18. Mapas ionosféricos del Evento 18 | 111 |
| 5.19. Mapas ionosféricos del Evento 19 | 112 |
| 5.20. Mapas ionosféricos del Evento 20 | 112 |
| 5.21. Mapas ionosféricos del Evento 21 | 113 |
| 5.22. Mapas ionosféricos del Evento 22 | 113 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Retardos ionosféricos según la frecuencia. | 24 |
| 2.2. Clasificación de las Tormentas Geomagnéticas según su grado de perturbación sobre la ionosfera Gonzalez et al. (1999). | 30 |
| 4.1. Eventos analizados. | 43 |
| 4.2. Rangos (TEC) de los días analizados, antes, durante y después del evento. | 44 |
| 4.3. Ciclos durante el evento e impacto correspondiente en la ionosfera. | 46 |

Agradecimientos

Durante cada etapa de la vida, tenemos esa pequeña necesidad de relacionarnos para salir adelante, y seguimos superando como persona, mi mayor agradecimiento a mis padres y hermano, por su apoyo incondicional. A mi asesor, el Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra por aceptarme como su estudiante, por su paciencia, apoyo y enseñanzas, muchas gracias. Al Dr. Héctor Román Pérez Enríquez, por tomarse el tiempo de compartir sus conocimientos, por aceptarme como su alumno de movilidad, por su apoyo y paciencia, muchas gracias. A la Dra. Rebeca López Montes, por su apoyo y tiempo dedicado para aconsejarme, muchas gracias. A mis profesores de posgrado, gracias por sus enseñanzas y atención brindada durante mis estudios, muchas gracias. Al Posgrado en Ciencias de la Información por aceptarme y apoyarme durante mi estancia en el posgrado, gracias.

Y Finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca que me otorgo para mi manutención durante mi estancia de posgrado, gracias.

Resumen

La ionosfera es una capa de la atmósfera terrestre, siendo esta una de las principales fuentes de error, para la tecnología de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS). Existen diferentes sistemas de navegación, que han implementado nuevas señales con el propósito de disminuir el error causado por la ionosfera, lo cual nos permite también, además de minimizar el error, poder estudiar el comportamiento del contenido de electrones a partir de estas nuevas señales. En este trabajo se analizaron mapas ionosféricos, realizados a partir de datos RINEX de la estación INEG, localizada en Aguascalientes, durante el periodo 2011-2018, centrándonos en tormentas geomagnéticas intensas (menores a -100 nT). El análisis de los mapas se llevará a cabo a partir de la Función de Densidad de Probabilidad, teniendo como resultado la distribución de los datos del mapa en gráficas, esta distribución se analizó en conjunto con los valores del TEC de la estación y el índice Dst durante el evento. Teniendo como resultado, la relación que tienen cada uno de estos parámetros durante los eventos.

Abstract

The ionosphere is a layer of the Earth's atmosphere, this being one of the main sources of error for global satellite navigation systems (GNSS) technology. There are different navigation systems that have implemented new signals with the purpose of reducing the error caused by the ionosphere, which also allows us, in addition to minimizing the error, to be able to study the behavior of the electron content from these new signals. This work analyzed ionospheric maps made from RINEX data from the INEG station located in Aguascalientes, during the period 2011-2018, focusing on intense geomagnetic storms (less than -100 nT). The analysis of the maps will be carried out with the Probability Density Function, resulting in the distribution of the map data on graphs, this distribution was analyzed in conjunction with the values of the station's TEC and the Dst index during the event. Having as results the relationship that each of these parameters have during events.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La ionosfera es una capa atmosférica variante entre la Mesósfera y la Exósfera, se extiende de los 60 a 1000 Km, se forma por el resultado de la absorción de la radiación de luz ultravioleta proveniente del Sol, dado a su alto contenido de electrones libres, influye en la propagación de señales electromagnéticas que la atraviesan.

El efecto de la ionosfera en las señales de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS), es la principal fuente de error en el posicionamiento, por medio de este sistema (Bouza, 2017); por ello, la importancia de implementar nuevas señales, que nos permitan disminuir el error de esta capa de la atmósfera terrestre. Además, es importante estudiar la ionosfera desde la perspectiva de las comunicaciones, ya que gracias a esta, es posible realizar emisiones de radio alrededor del planeta.

El Contenido Total de Electrones (TEC) se define como el número total de electrones integrado a lo largo de la ruta desde el satélite hasta el receptor GNSS en la superficie terrestre. La frecuencia dual del sistema GPS, es un medio que nos permite, verificar el estado de la ionosfera, ya que esta interactúa de diferente manera dependiendo la frecuencia. Por ello la importancia de tener dos frecuencias diferentes (L1 y L2), ya que esto permite medir el retardo de fase relativo entre las dos señales, debido a la dependencia que existe entre la densidad electrónica en la

ionosfera y el retraso que se genera en cada frecuencia. De esta manera, conociendo el retardo de cada frecuencia es posible determinar el TEC en la ionosfera, en otros palabras, se puede medir el grado de ionización entre la línea de visión del satélite al receptor.

El impacto del sol en la ionosfera se ha analizado de diferentes maneras durante un gran número de estudios, ya que es importante el monitoreo, y seguimiento de la relación sol-tierra. Las eyecciones de masa coronal (EMC), son nubes de partículas cargadas eléctricamente que salen de la atmósfera solar, viajan a través del medio interplanetario y al llegar al entorno terrestre impactan en el campo geomagnético, y a su vez sobre la ionosfera terrestre. Todo esto provoca la ocurrencia de tormentas geomagnéticas, perturbaciones ionosféricas positivas y/o negativas, fallas en las órbitas de los satélites, y daños en las corrientes eléctricas de alta tensión, entre otras cosas. Además de las EMC, el sol es capaz de emitir ráfagas solares o fulguraciones solares, las cuales se definen como la emisión de rayos X, gamma, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio. Las ráfagas solares, dependiendo su intensidad, pueden provocar efectos de interferencia en telecomunicaciones y radiocomunicaciones, además de fallas en los sistemas de posicionamiento global. Otro evento solar que podría tener repercusiones en la tierra, son las partículas energéticas solares, las cuales, son un conjunto de protones, neutrones y electrones, acelerados por fulguraciones solares. Estas partículas energéticas pueden provocar daños en componentes de los satélites, y dosis de radiación peligrosa para los astronautas (Grechnev et al., 2013).

1.2. Objetivos

Objetivo General:

- Analizar el comportamiento de la ionosfera durante tormentas geomagnéticas intensas y determinar su dependencia con los ciclos estacionarios y solares, esto con base en el contenido total de electrones durante eventos geomagnéticos.

Objetivos Particulares:

- Realizar la clasificación de los eventos a partir del ciclo solar y estacionario.
- Producir mapas ionosféricos utilizando una sola estación GNSS.
- Aplicar la función PDF a los mapas ionosféricos.
- Analizar el impacto de cada uno de los ciclos (solar y estacionario) durante los eventos.

1.3. Justificación

Es importante conocer el estado de la ionosfera desde diferentes puntos de vista, ya que durante tormentas intensas, las telecomunicaciones pueden tener fallos graves o incluso dejar de funcionar, fallas en órbitas de los satélites o errores en la navegación, así como también podría provocar daños en centrales eléctricas, que a su vez podría poner en riesgo vidas humanas. Debido a esto, la importancia de estudiar estos fenómenos, cabe mencionar que desde el 2014 la ley general de protección civil, reconoce por primera vez, a los fenómenos astronómicos y la necesidad de crear y promover políticas publicas relacionadas con sus riesgos, siendo esto un indicador del interés que existe en este tipo de eventos.

1.4. Hipótesis

Debido a que las tormentas geomagnéticas pueden causar perturbaciones ionosféricas importantes, mediante la implementación de la función de densidad de probabilidad, es posible encontrar características en los eventos, que demuestren la relación con el ciclo solar y estacionario.

1.5. Antecedentes

El primer registro de la ionosfera ocurrió cuando se estudiaron pequeñas anomalías que se producían en el campo magnético terrestre. Sin embargo, su estudio se consideró mucho más serio en 1899 cuando Marconi demostró su técnica de comunicaciones a través del canal de la Mancha. Pero su existencia queda claramente establecida en 1901 cuando Marconi transmitió señales de radio exitosamente a través del Atlántico, esto demostró que las ondas de radio se reflejaban alrededor de la superficie terrestre a grandes distancias (Cipagauta, 2007).

Las moléculas y átomos de la ionosfera sufren disociación debido a la interacción que tienen con la energía solar, a dicho proceso se le llama ionización (Razin et al., 2016). Las características físicas y químicas de la ionosfera cambian con respecto a la actividad solar y magnética, localización geográfica, hora del día y estaciones del año (Hong, 2008). Sin embargo, la mayoría de las variaciones ionosféricas se asocian principalmente con la actividad solar y condiciones geomagnéticas (Razin et al., 2016). La ionosfera afecta la propagación de ondas de radio, es posible cuantificar el impacto de la ionosfera en la señal con base a su Contenido Total de Electrones, por sus siglas en inglés (TEC), que está en dependencia a la densidad de electrones a lo largo de la trayectoria del satélite al receptor (Jakobsen et al., 2010).

Antes de que surgieran las señales GNSS la ionosfera no estaba lo suficientemente estudiada, ya que su estudio era limitado en el espacio y se basaban principalmente en técnicas de medición terrestres, tales como radares terrestres, sondas laterales que utilizan rotaciones de Faraday, efecto Doppler, sistemas de seguimiento de doble frecuencia de microondas, etc. Aunque la intención principal del sistema GNSS es la navegación, la transferencia de tiempo y posicionamiento relativo, debido a la interacción de la ionosfera con las señales es posible estudiarla, por lo tanto, los GNSS son una excelente oportunidad para investigarla. En la actualidad el estudio de la ionosfera terrestre tiene un especial interés debido a su impacto en las comunicaciones, por ejemplo, en la transmisión de señales de radio, incertidumbre en los sistemas de posicionamiento y errores en las comunicaciones por satélite (Klobuchar, 1997).

De acuerdo con Rodger y Jarvis (2000) una de las técnicas más utilizadas actualmente para conocer el estado de la ionosfera es el cálculo del Contenido Total de Electrones mediante dispositivos GNSS, debido a la disponibilidad de la información en bases de datos.

Gracias a la factibilidad y confiabilidad de estudiar la ionosfera a partir de las señales GPS los estudios de esta índole se han incrementado, esto considerando también la importancia de la ionosfera en las comunicaciones y la navegación. Los estudios ionosféricos están estrechamente relacionados con los fenómenos de la relación Sol-Tierra ya que hay diversos eventos solares que tienen consecuencias en el estado de la ionosfera.

Algunos de los estudios que se han realizado recientemente y que implementan las señales GPS para el análisis del TEC, son por ejemplo los trabajos realizados por Shreedevi et al. (2018); Lin y Zhu (2018); Atıcı (2018); Liu et al. (2018); Bounhir et al. (2017); Kundu et al. (2018); Patel et al. (2018), entre otros. Actualmente se realiza una gran cantidad de estudios que utilizan a los GPS ya que el efecto ionosférico sobre las señales GPS proporciona la información necesaria para comprender las variaciones temporales y espaciales de la ionosfera y sus efectos en la navegación y los sistemas de comunicación por satélite (Olwendo et al., 2012). Desde la perspectiva del clima espacial también se analiza la ionosfera y su relación con eventos solares (Thirupathaiah et al., 2019; Yasyukevich et al., 2018; Ribeiro et al., 2018; Alizadeh et al., 2018). También existen una gran variedad de estudios de la ionosfera durante tormentas geomagnéticas (Yeeram, 2019; Dugassa et al., 2019; Qian et al., 2019; Sieradzki y Paziewski, 2019).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS)

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS), incluidos el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de EE. UU., GLONASS de Rusia, Galileo de la UE y Beidou de China (también llamado COMPASS), así como varios sistemas de navegación por satélite regionales, se pueden caracterizar como un conjunto de sistemas altamente precisos y continuos. Cada satélite GNSS transmite continuamente señales de radio en dos o más frecuencias en banda L (1–2 GHz) con una longitud de onda de aproximadamente 20 cm, las señales directas se utilizan para la navegación, el posicionamiento y la sincronización. Las señales refractadas de los satélites de ocultación de radio GNSS junto con las observaciones GNSS en tierra pueden proporcionar el vapor de agua troposférico de alta resolución, 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).

2.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

La constelación de satélites GPS consta de 32 satélites (31 satélites operativos) en 6 planos orbitales igualmente espaciados a 55 grados de inclinación, separados por 60 grados de ascensión recta del nodo ascen-

dente (ángulo a lo largo del ecuador desde un punto de referencia hasta la intersección de la órbita), y a 20.200 km de altitud (Misra y Enge, 2011). Cada plano contiene al menos cuatro "Ranuras" ocupadas por satélites GPS. Esta geometría orbital y la distribución de satélites GPS aseguran que los usuarios en tierra puedan ver al menos cuatro satélites desde prácticamente cualquier punto de la Tierra. Cada uno de los satélites GPS transmite sus señales continuamente a dos frecuencias de radio en la banda L del espectro de radio (Crowley y Azeem, 2018).

Componentes del GPS

El GPS consiste en tres principales segmentos:

- a) Segmento espacial.
- b) Segmento control.
- c) Segmento usuario.

a) Segmento espacial.

Los segmentos espaciales consisten en satélites GPS en órbita alrededor de 20,000 km por encima de la Tierra.

Actualmente hay en órbita 31 satélites GPS, entre los operativos y los de reserva. Cada satélite tiene una vida aproximada de diez años y se van sustituyendo continuamente los satélites obsoletos con unos nuevos y mejorados para mantener operativa la constelación.

Los satélites siguen una órbita no geoestacionaria y casi circular de un radio de 26.560 Km, la velocidad de los satélites es de unos 3.218 Km/h, esta velocidad les permite dar dos veces la vuelta al planeta cada 24 horas. Cada satélite invierte 11 horas y 58 minutos en dar una vuelta completa a su órbita (Olmedillas, 2012).

b) Segmento control.

Formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites. Este segmento es complejo en su definición, siendo propio de cada país o coalición de países, y estructurándolos en función de distintos criterios como más convenga.

Sus funciones son garantizar las prestaciones del sistema mediante monitoreo del segmento espacial y aplicar correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los distintos satélites.

La estructura básica para todo GNSS, es un conjunto de estaciones de monitorización y una estación de control, que reciben las señales de los satélites y son capaces de llevar a cabo las funciones anteriormente citadas. Cada estación genera su propia información sobre el funcionamiento del sistema, en última instancia esta información se envía a una estación de control que aplica dichas correcciones al satélite del GNSS, en cuanto a su posición orbital y coordenadas temporales, o bien retransmite la información a un satélite geoestacionario que forma un sistema de aumento (como se hace en la actualidad con el GPS, en países que no tienen un segmento espacial propio). Como la posición de cada estación

y las coordenadas temporales se conocen (cada estación está equipada con un reloj atómico de cesio), se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que determine la localización espacial y temporal del satélite.

En última instancia se envía a través de las estaciones de monitorización o de control la nueva información al satélite, que corrige así su órbita y su mensaje de navegación (Gombosi, 1998).

La estructura del segmento de control está compuesta por la estación de control maestra y estaciones de monitoreo, las cuales realizan las siguientes actividades.

Estación de control maestra

- Monitorización y mantenimiento del estado de salud de los satélites.
- Monitorización de las órbitas de los satélites.
- Estimación de los parámetros de las efemérides y de los relojes de los satélites.
- Generación de los mensajes de navegación.
- Mantenimiento del servicio de tiempos y su sincronización con el tiempo universal coordinado.
- Envío de órdenes de maniobras para mantener las órbitas o para el reposicionamiento de las plataformas.

Estaciones de monitoreo

- Seguimiento de la señal de navegación.
- Medida de la portadora y la distancia.
- Recolección de datos atmosféricos.
- Comprobación de los datos de navegación entregados al usuario (Gleason et al., 2009).

c) Segmento usuario.

Formado por los equipos GPS que reciben las señales que proceden del segmento espacial. Está formado por un conjunto de elementos básicos que son:

Antena receptora de GPS a la frecuencia de funcionamiento del sistema, de cobertura hemiesférica omnidireccional. Puede ser de muchas formas y materiales, dependiendo de las aplicaciones y del coste del receptor; monopolo, dipolo, dipolo curvado, cónico-espiral, helicoidal o microstrip.

Receptor: es del tipo heterodino, basado en la mezcla de frecuencias que permite pasar de la frecuencia recibida en la antena a una baja frecuencia que podrá ser manejada por la electrónica del receptor. Contiene un reloj altamente estable (generalmente un oscilador de cristal) y normalmente una pantalla donde mostrar la información de posicionamiento.

Señales GPS

Los satélites del sistema GPS transmiten su información principalmente en dos frecuencias de uso civil que son L1 y L2, más el mensaje de navegación que está asociado a los códigos asignados como son el código de Adquisición Aproximativa (C/A) y Código de Precisión (Código P). En la frecuencia L1 sólo se transmite en la portadora el código de Adquisición Aproximativa o Código (C/A) y en la frecuencia L2 se transmite en la portadora con el Código de Precisión o (Código P), el código P que empezó con la generación del Bloque IIR-M (Segundo Reemplazo Modernizado) de satélites GPS. El código C/A es utilizado por los receptores civiles para localizar la posición. El código se utiliza para determinar la pseudodistancia (la distancia evidente para el satélite), que se utiliza entonces por el receptor GPS para determinar la posición. El código C/A es más robusto en comparación con el código P. 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 modernizó las señales GPS, los beneficios de la señal L5 cumplen con los requisitos críticos de seguridad para las aplicaciones necesarias de la vida diaria, tales como la aviación civil, también tiene beneficios como: Mejora de 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).

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).

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). Las variaciones de la actividad solar y de la emisión de plasma desde la corona solar provocan cambios dramáticos en el ambiente espacial que circunda la tierra, quien se encarga de estudiar estos cambios es una rama del llamado "Clima espacial" (Radicella, 2000).

La ionosfera se puede dividir en tres regiones geográficas amplias cuyos comportamientos son muy diferentes. La región ecuatorial o de baja latitud, de aproximadamente $+30^\circ$ a -30° de latitud geomagnética, se caracteriza por los valores más grandes de contenido de electrones y la presencia de grandes gradientes en la distribución espacial de la densidad de electrones. En esta región tiene lugar la anomalía geomagnética que produce dos picos de contenido de electrones a aproximadamente 20° al norte y al sur del ecuador geomagnético en el hemisferio iluminado por el sol. Las regiones de latitudes medias, desde aproximadamente $\pm 30^\circ$ a $\pm 60^\circ$ de latitud geomagnética presentan las variaciones más regulares, aunque las tormentas ionosféricas pueden traer cambios repentinos hasta aproximadamente el 20% o más de su contenido total de electrones.

Las regiones polares o de latitud alta están dominadas por el campo geomagnético y sus cambios son bastante impredecibles (Brunini et al., 2004).

La variabilidad de la ionosfera está dominada por el sol, aparte del ciclo diario las variaciones regulares están asociadas con el ciclo solar y el ciclo estacionario. El nombre "*Ionosfera*" fue introducido en 1930 por Watson Watt, se ha estudiado durante más de 100 años utilizando diferentes técnicas de observación, hoy consideradas clásicas. Se realizó una gran red global de ionosondas de incidencia vertical que comenzó a funcionar durante el Año Geofísico Internacional 1957-1958. Los radares de retrodispersión incoherentes se utilizaron después de 1958 para explorar la parte superior de la ionosfera. En 1957, la era espacial comenzó a habilitar ionosondas superiores a bordo de satélites, observaciones de la rotación de Faraday en señales transionosféricas emitidas por satélites geostacionarios, método Doppler con cohetes y satélites y técnicas de sondas a bordo de naves espaciales (Brunini et al., 2004).

2.2.1. Estructura de la ionosfera

La ionosfera representa sólo el 1% de la atmósfera terrestre, pero, es considerada como la componente del ambiente espacial más sensible a las variaciones solares y a las variaciones del espacio cercano que dependen de éstas (Radicella, 2000). Cuando la radiación solar incide sobre los constituyentes químicos de la atmósfera, los electrones del medio son desprendidos de los átomos y las moléculas para producir el plasma ionosférico, la presencia de estas partículas cargadas hacen de la atmósfera superior un conductor eléctrico que soporta grandes corrientes eléctricas y afecta a las ondas de radio (López, 2015).

La ionosfera se divide en diferentes regiones o capas (D, E, F1 y F2) según la composición neutra y la fuente de ionización a diferentes alturas. La región D abarca altitudes que van desde los 50 hasta los 90 km, la capa E varía entre los 90 y 150 km y, por último, la capa F se subdivide en F1 y F2, las cuales se ubican entre los 150 y 500 km de altitud (Figura 2.1). Las alturas varían en función de los cambios diarios así como del comportamiento de la actividad solar (Anderson y Fuller-Rowell, 1999).

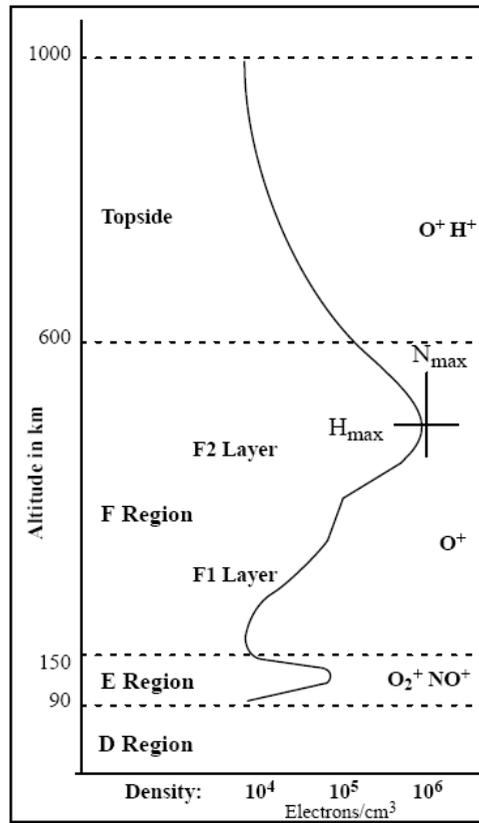


Figura 2.1: Perfil ionosférico por Anderson y Fuller-Rowell (1999).

Capa *D*

La principal fuente de ionización es la radiación solar más intensa: los rayos X de longitud de onda entre 0,2 – 0,8 nm ionizan todos los constituyentes, especialmente el *O2* y *N2* que son los mayoritarios en esta región, la radiación *Lyman* –(α) ioniza el óxido nítrico (*NO*) y la radiación ultravioleta (UV) ioniza el *O2* y *N2*. La absorción disminuye por la noche y tiene su máximo alrededor del mediodía.

Capa *E*

La principal fuente de producción a estas alturas es la radiación UV entre 80 – 102,7 nm que ioniza el *O2*. Una posible causa de que la capa E no desaparezca por la noche es la ionización ocasionada por meteoritos. La anomalía más importante de la capa E es la aparición de la capa E esporádica (*Es*). Esta capa consiste en un incremento anormal de la ionización en un nivel de unos 100 km que se extiende sobre un área limitada de un radio de unos 1000 km ó 2000 km. Puede presentarse a cualquier hora del día y de la noche. La causa principal de la existencia de esta *Es* en latitudes medias es la variación del viento con altura, que, junto a la presencia del campo magnético terrestre, consiguen comprimir la ionización (Hargreaves, 1992). La estructura vertical de la capa *E* está determinada por los efectos de la ionización y la recombinación. Por la noche la capa *Es* desaparece rápidamente, debido a que la radiación solar ya no está presente.

Capa *F*

La capa *F* presenta una deformación en su perfil de densidad durante el día, dando origen a las capas *F1* y *F2*. La primera se localiza a una altura de entre los 150 y los 200 km, presentando componentes ionizados de *N2* y *O* y la segunda, se presenta a altitudes que van desde los 200 hasta los 500 km. A alturas de la capa *F2*, la densidad de la atmósfera disminuye y los procesos de difusión arrastran el plasma hacia arriba. El máximo de densidad electrónica se produce a la altura en el que los dos procesos (producción y difusión) son igualmente importantes. La principal fuente de producción en la capa *F2* es la fotoionización del *O*

que produce O^+ . El O^+ se recombina rápidamente con el N_2 y el O_2 formando otros iones que se recombinan con los electrones libres. Así, la producción de electrones está controlada por la concentración de O mientras que la pérdida está controlada por la concentración de N_2 y O_2 .

Posteriormente se descubrió una nueva capa por debajo de la capa D, llamada capa C (Figura 2.2).

Capa C

La capa C, es la región más densa de la ionosfera y aparece sólo un par de horas al día a altitudes inferiores a la Capa D. La presencia de esta capa se atribuye a los efectos de la radiación cósmica. Algunos autores la ubican entre 60 y 70 km de altura (Rasmussen et al., 1980), y otros por debajo de los 50 km (Davies, 1990). A estas alturas los átomos son más numerosos, lo cual provoca mayor ionización, lo que hace que la tasa de recombinación sea mayor que en otras capas, debido a esto desaparece rápidamente.

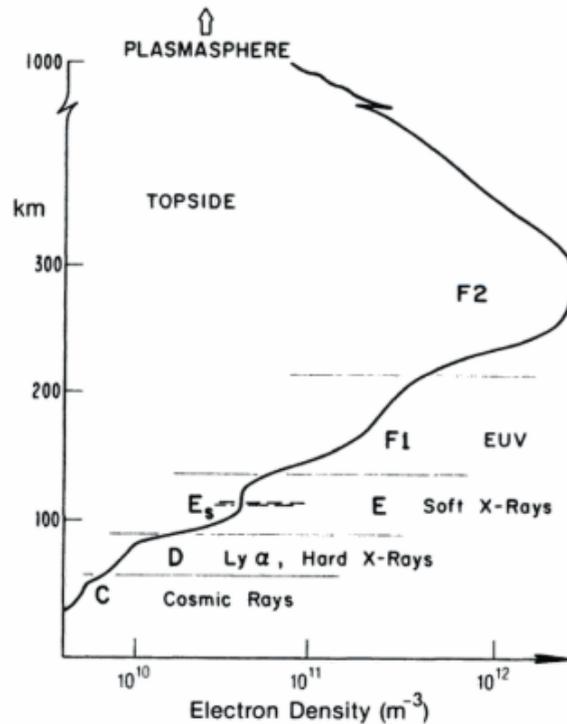


Figura 2.2: Perfil ionosférico donde se incluye a la capa C por Davies (1990).

2.2.2. Perturbaciones ionosféricas

Las perturbaciones en la ionosfera se producen por la relación de ésta con la emisión de radiación electromagnética y plasma desde el Sol y las variaciones de flujo de los mismos, lo cual está relacionado con la actividad solar, así como a los movimientos de rotación y traslación de la Tierra (López, 2015). De esta manera las perturbaciones de la ionosfera terrestre se pueden dividir en dos grupos principales:

1. Regulares: Son fáciles de predecir debido a que son ocasionadas

por el movimiento de la tierra y por los ciclos solares.

2. Irregulares: Son el resultado del comportamiento aleatorio del Sol y por lo tanto es imposible conocer cuándo se presentará una de ellas.

De acuerdo con López (2015) estas perturbaciones tienen efectos importantes sobre la morfología ionosférica y por lo tanto, en la propagación de ondas de radio.

Perturbaciones regulares

La variación diaria, variación estacional, variación con el ciclo solar y variación con el ciclo de rotación del sol forman parte de las perturbaciones regulares.

• Variación diaria

Las variaciones diarias en la ionosfera son el resultado de la rotación de la Tierra. En el amanecer, la densidad electrónica comienza a incrementarse rápidamente debido a la fotoionización y la densidad sigue aumentando a lo largo de todo el día. Durante la noche, la fuente de ionización principal desaparece y sólo quedan aquellas regiones de la ionosfera en que la producción depende de otros mecanismos físico-químicos. La ionización en las regiones D y E depende de la radiación solar y del ángulo de incidencia, en las horas en que el Sol se encuentra cerca del cenit se produce una mayor ionización (Chapman, 1931). La figura 2.3 muestra la estructura vertical de la ionosfera durante el día y la noche.

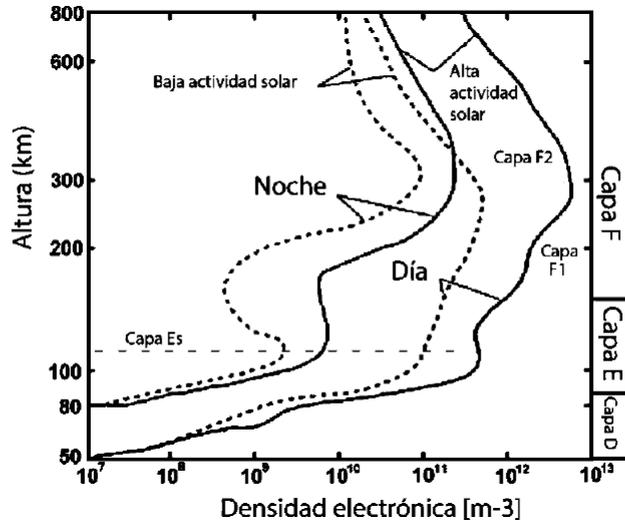


Figura 2.3: Estructura vertical de la ionosfera para el día y la noche en alta y baja actividad solar en latitudes medias por Hargreaves (1992)

• Variación estacional

Las variaciones estacionales son el resultado del movimiento de traslación de la tierra, la ionosfera exhibe fuertes variaciones estacionales y del ciclo solar porque la principal fuente de ionización y energía para la ionosfera es la fotoionización. Por lo tanto, siempre que cambie el ángulo cenital solar o el flujo de las radiaciones solares, la dinámica de la ionosfera puede reflejar estos cambios. Las variaciones estacionales de la ionosfera están relacionadas con el cambio del ángulo del cenit solar. Las capas *D*, *E* y *F1* corresponden a los ángulos cenitales más grandes al Sol, por lo que la densidad de ionización de estas capas es más grande durante el verano que en invierno. Sin embargo, la capa *F2* tiene una ionización mas grande durante el invierno y menor en verano, aun cuando el ángulo cenital al Sol es más pequeño en verano. A esto se le llama "anomalía estacional", que ocurre debido a cambios en la atmósfera neutra, es decir, la circulación de la atmósfera neutra

de verano a invierno resulta en un incremento del cociente $O/N2$ en el hemisferio de invierno y un decrecimiento en el hemisferio de verano. El incremento de la densidad de O y el decrecimiento de la densidad de $N2$ en invierno hace que se incremente el $O+$, por lo que la densidad de $O+$ en invierno es mayor que en verano en la capa F (López, 2015).

- **Variación con el ciclo solar**

La variación con la actividad solar se debe a la variación de la intensidad de la radiación solar a lo largo de un ciclo solar. Durante los períodos de máximo solar en los que la radiación, especialmente la radiación de rayos X y UV (principal fuente de ionización) aumenta, la densidad electrónica en la ionosfera responde con una mayor ionización que durante los períodos de mínimo solar (Wright, 1962).

- **Variación con el ciclo de rotación del sol**

El sol gira sobre su propio eje una vez cada 27 días, esta rotación se detectó observando el movimiento de las manchas solares (NASA, 2019). El ciclo de rotación causa variaciones en la densidad en la ionosfera. Las fluctuaciones en la capa $F2$ son más grandes que para las demás regiones (López, 2015).

Perturbaciones irregulares

Las variaciones son irregulares e impredecibles debido a que el origen principal es el comportamiento irregular del sol y tienen un importante efecto sobre la propagación de ondas de radio.

- **Esporádica E_s**

Está asociada con tormentas, meteoritos, actividad solar y geomagnética. Se trata de un aumento irregular muy marcado y rápidamente variable de la densidad de electrones en la capa E. Pueden ocurrir durante el día o la noche y cambian significativamente con la latitud. Cuando ocurren estas variaciones, las reflexiones en la capa esporádica E hacen posible la comunicación de ondas de mayor frecuencia que habitualmente no son percibidas.

- **Perturbaciones ionosféricas súbitas**

Son causadas por las ráfagas solares incrementan la ionización súbitamente en la región D. Causando absorción de frecuencias medias que pueden durar desde minutos hasta horas. Estas perturbaciones son más comunes en regiones ecuatoriales (Méndez, 2017). Cuando las perturbaciones ionosféricas súbitas ocurren, se caracterizan por un marcado decremento en las radiocomunicaciones de onda corta. Como resultado de este fenómeno, las ondas de radio de alta frecuencia que normalmente pasarían a través de la capa *D* y se reflejarían en los niveles más altos, son absorbidas. Por lo tanto, las comunicaciones por radio a larga distancia, que dependen de la reflexión en la ionosfera, quedan interrumpidas súbitamente durante periodos de tiempo que van de 15 minutos a una hora (López, 2015).

- **Tormentas ionosféricas**

Estrechamente relacionadas a los eventos de EMC que comprimen la magnetósfera. Las tormentas ionosféricas son variaciones en la densidad electrónica de la ionosfera y están relacionadas con tormentas geomagnéticas, las cuales resultan de una compresión de la magnetosfera debida a una perturbación en el viento solar. Son de mayor duración que las perturbaciones ionosféricas súbitas y afectan principalmente a la región *F2* aunque para eventos demasiado energéticos pueden afectar incluso regiones más bajas, además, las frecuencias críticas son más bajas que las normales.

- **Efectos producidos desde abajo de la ionosfera**

La dinámica de la termósfera particularmente a 100-250 km de altitud involucra eventos como mareas atmosféricas que son generadas en la atmósfera baja (mesósfera y estratósfera) y se propagan hacia alturas ionosféricas bajas. Las mareas son oscilaciones de escala global producidas principalmente por ozono en la estratósfera y oxígeno molecular en la baja termósfera (Schunk y Nagy, 2009). Las ondas de gravedad también pueden ser generadas en la baja atmósfera y propagarse hacia alturas ionosféricas.

2.2.3. Contenido Total de Electrones (TEC)

La ionosfera se caracteriza por la cantidad de electrones libres que se encuentran en ella debido a la interacción de la atmósfera con los vientos o ráfagas solares, por lo tanto cuantificar esta cantidad de electrones libres nos permite analizar su estado, de tal manera que el Contenido Total de Electrones en la ionosfera es un parámetro importante que define el estado en que se encuentra.

El TEC es un indicador de la variabilidad ionosférica derivada de la señal GPS modificada por los electrones libres en la ionosfera. El rango nominal es de $10^{16}e/m^2$ a $10^{19}e/m^2$ a lo largo de la trayectoria de la onda radio, donde los mínimos y máximos se producen en la media noche y media tarde aproximadamente. La comprensión de los complejos entornos ionosféricos sigue siendo un reto debido a la falta de observaciones directas, sobre todo en las zonas polares, por ejemplo, la Antártida. El TEC puede ser modelado a nivel mundial y continental. Los iones en los que se encuentra presente el TEC son ($O+$, $H+$, $He+$, $NO+$, $O2+$) (Bilitza et al., 2011).

El TEC retarda las señales de diferente manera dependiendo la frecuencia, la Tabla 2.1 muestra los efectos en las distintas frecuencias. Debido a que el TEC afecta de diferentes maneras las distintas frecuencias, es posible determinar el contenido total con base al retardo que se genera en ambas bandas de las señales GNSS.

| Frecuencia | TEC nocturno $10^{16}e/m^2$ | TEC diurno $10^{19}e/m^2$ |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 100 MHz | 40.3 m | 4030 m |
| 1227.6 MHz (L2) | 26.7 cm | 26.7 m |
| 1575.42 MHz (L1) | 16.2 cm | 16.2 m |
| 10 GHz | 4 mm | 40 cm |
| 100 GHz | 0.04 mm | 4 mm |

Tabla 2.1: Retardos ionosféricos según la frecuencia.

Contenido Total de Electrones Inclinado

El Contenido Total de Electrones Inclinado es la densidad de electrones a lo largo de un trayecto oblicuo entre un satélite y un receptor (Figura 2.4), expresada en Unidades del TEC (TECU). Donde $1TECU = 10^{16}electrones/m^2$.

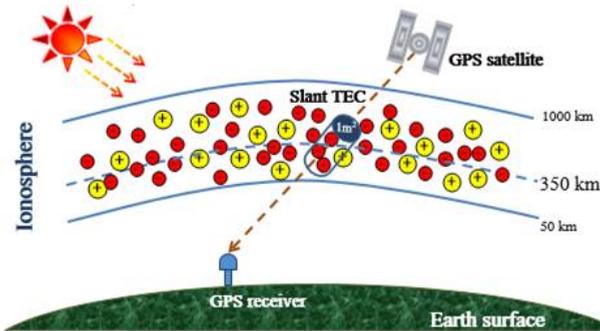


Figura 2.4: TEC inclinado desde un satélite a un receptor (Cortesía de <http://iono-gnss.kmitl.ac.th/>).

La ionosfera tiene iones y electrones libres. Las partículas se separan en iones y electrones cuando el sol irradia a través de la ionosfera. Los electrones libres afectan a las señales de los satélites GNSS y causan retardo de propagación. En general la densidad de electrones es más alta durante el día que la noche.

El TEC inclinado se puede calcular a partir de la integral de camino N_e , donde N_e es la densidad de electrones (electrones / m^3), es decir:

$$STEC = \int_S N_e ds (TECU) \quad (2.1)$$

Donde S es la distancia a lo largo de la trayectoria de propagación (m).

En general, los valores de STEC de noche son más pequeños que en el día. La Figura 2.5 muestra un ejemplo del STEC calculado a partir de los datos de los satélites GPS, cada color representa el STEC computarizado de la fase de pseudodistancia y portadora de cada satélite.

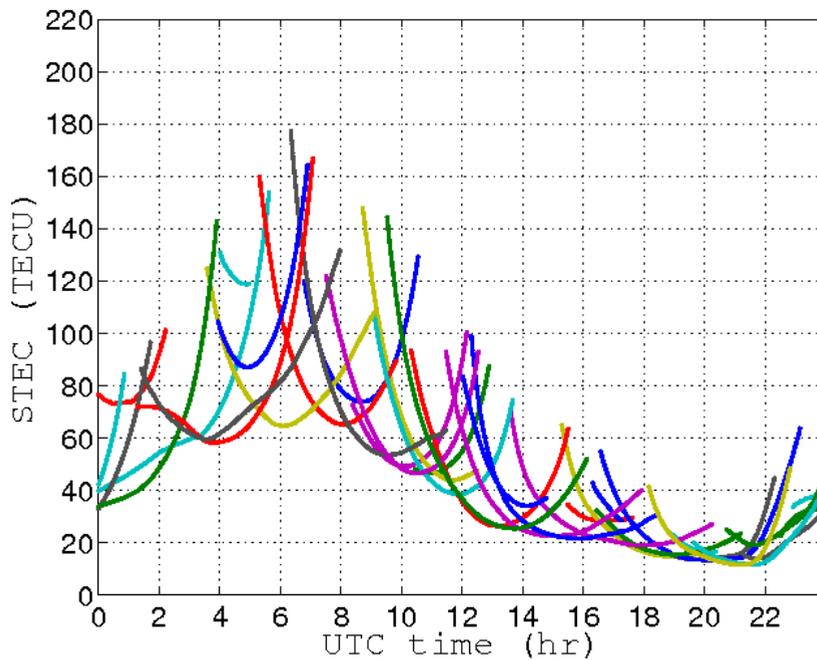


Figura 2.5: Ejemplos del STEC calculado usando datos GPS por Arora et al. (2016).

A partir del Contenido Total de Electrones Inclinado es posible obtener el Contenido Total de Electrones Vertical que es el número total de densidad de electrones en una trayectoria vertical (Figura 2.6), también expresada en TECU.

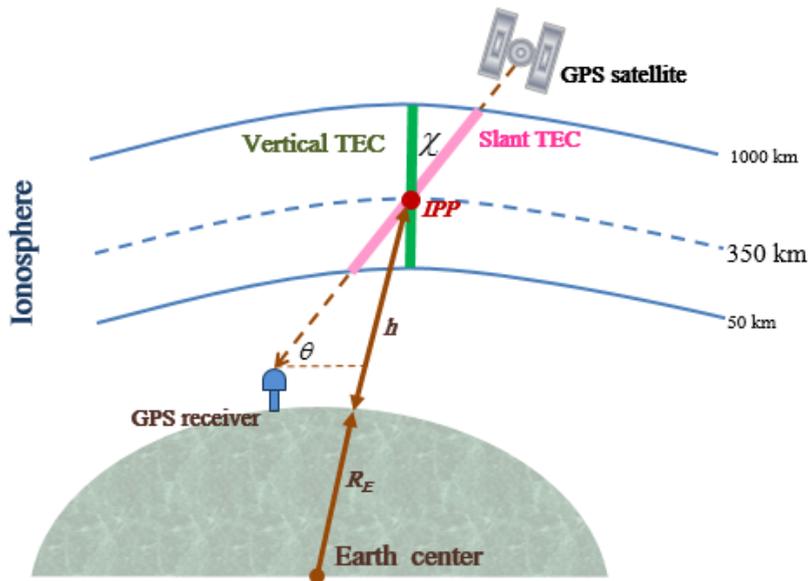


Figura 2.6: Contenido Total de Electrones Vertical (Cortesía de <http://iono-gnss.kmitl.ac.th/>).

2.3. Campo geomagnético

La interacción entre el medio interplanetario y la magnetosfera terrestre es uno de los temas de estudio más importantes en el contexto de las relaciones Sol-Tierra. La energía y las partículas pueden entrar en la magnetosfera cuando se produce la reconexión entre el campo magnético interplanetario (FMI) y el campo geomagnético (Ballatore, 2002).

2.3.1. Tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas están relacionadas con la variación temporal de la magnetósfera terrestre por acción del Sol. Estas son provocadas por la transferencia de energía entre la presión de una onda de choque del viento solar y la compresión del campo geomagnético. Ambas interacciones causan un aumento en el movimiento del plasma a

través de la magnetósfera (impulsada por el aumento de campos eléctricos dentro de la magnetósfera) y un aumento de la corriente eléctrica en la magnetósfera y la ionosfera (Tsurutani et al., 2003).

Desde hace tiempo se sabe que el componente horizontal, H , del campo geomagnético está comprimido durante los períodos de grandes perturbaciones magnéticas y que la recuperación a su nivel promedio es gradual (Broun, 1861; Adams, 1892; Moos, 1910). Estos estudios han demostrado que en las latitudes ecuatorial y media la disminución de H durante una tormenta magnética puede representarse aproximadamente por un campo magnético uniforme paralelo al eje dipolar geomagnético y dirigido hacia el sur. La magnitud de este campo de perturbación axialmente simétrico varía con el tiempo de tormenta, definido como el tiempo medido desde el inicio de la tormenta. El inicio de una tormenta magnética a menudo se caracteriza por un aumento repentino global de H , que se conoce como el Comienzo Repentino de la Tormenta, por sus siglas en inglés (SSC).

Después de la SSC, el componente H generalmente permanece por encima de su nivel promedio durante algunas horas; Esta fase se llama la fase inicial de la tormenta. Luego comienza una gran disminución global de H , lo que indica el desarrollo de la fase principal de la tormenta. La magnitud de la disminución de H representa la gravedad de la perturbación. Aunque la descripción anterior proporciona características estadísticas medias de tormentas magnéticas, las variaciones en casos individuales difieren mucho de una tormenta a otra (GEDI, 2019).

Para poder determinar el grado de intensidad de estas tormentas es necesario caracterizarlas por medio de un índice, el cual se denomina índice Dst (Disturbance Storm Time).

2.3.2. Índice Dst

El índice Dst representa el campo magnético de perturbación simétrica axialmente en el ecuador dipolo en la superficie de la Tierra. Las perturbaciones importantes en Dst son negativas, es decir, disminuciones en el campo geomagnético. Estas disminuciones de campo son producidas principalmente por el sistema de corriente ecuatorial en la magnetosfera, generalmente conocida como corriente de anillo. La corriente que

fluye a través de la cola magnetosférica hace una pequeña contribución al campo que disminuye cerca de la Tierra (GEDI, 2019).

Este índice se encarga de medir perturbaciones geomagnéticas que se sabe están estrechamente relacionadas con los cambios en la densidad ionosférica. Se obtiene por observatorios muy cercanos a la zona ecuatorial que miden la intensidad de la corriente eléctrica concentrada en el anillo de corriente y que describen el comportamiento de la magnetósfera. Sus unidades son los nanoteslas (nT). Un Dst positivo representa compresión sobre la magnetósfera debido al aumento de la presión del viento solar, mientras que valores alrededor del cero representan una magnetosfera tranquila. Por último, un Dst negativo delataría la ocurrencia de una perturbación ionosférica. Este último puede durar desde horas hasta días. Incluso durante esta etapa pueden generarse segundas caídas, aún y cuando la magnetósfera no ha logrado recuperarse completamente. Son cuatro los observatorios geomagnéticos que orbitan la Tierra a bajas latitudes y que trabajan conjuntamente en la caracterización de este índice: Hermanus en el sur de África, Honolulu y San Juan ambos en EUA y por último Kakioka en Japón (Méndez, 2017). Gonzalez et al. (1999) realizó una clasificación de las tormentas geomagnéticas según su grado de perturbación Tabla 2.2.

| 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 | $Dst \leq -250$ |

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

2.4. Fenómenos relación Sol-Tierra

Para estudiar el Clima Espacial, así como sus efectos en la Tierra, es necesario estudiar la actividad solar tanto por radiación como por partículas. A continuación se describen varios fenómenos que ocurren en el Sol.

2.4.1. Eyecciones de Masa Coronal (EMCs) y Ráfagas solares

Las ráfagas solares y las EMCs son las explosiones más energéticas del sistema solar. La atmósfera solar y la corona están estructuradas por fuertes campos magnéticos. La atmósfera solar puede liberar súbitas y violentas burbujas de plasma y campos magnéticos llamadas Eyecciones de Masa Coronal. Una gran EMC puede contener mil millones de toneladas de materia que puede ser acelerada hasta varios millones de millas por hora en una explosión espectacular. La materia solar sale a través del medio interplanetario, impactando cualquier planeta o nave espacial en su camino. El plasma solar se calienta a decenas de millones de grados; hay una aceleración a grandes energías de electrones, protones y elementos más pesados. Los electrones supercalientes se mueven a lo largo de las líneas de campo magnético más rápidamente de lo que lo puede hacer el viento solar. Se piensa que el rearreglo del campo magnético y las ráfagas solares pueden dar lugar a la formación de ondas de choque que aceleran partículas al frente del bucle de la EMC (López, 2010).

A medida que la eyección es expulsada por el Sol, ésta crea una onda de choque que acelera al viento solar y modifica la intensidad del campo magnético, estas dos magnitudes aumentan dentro de una región cercana al choque.

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1. Metodología

El índice Dst utilizado se obtuvo de la página web del Centro de Análisis de Datos para Geomagnetismo y Magnetismo Espacial de la Universidad de Kyoto, centrándonos en las tormentas geomagnéticas intensas ($Dst \leq -100nT$). A partir del índice Dst identificamos los eventos y se descargaron los archivos RINEX. Con los datos RINEX se calculó el Contenido Total de Electrones. A partir del TEC y el índice Dst se realizaron gráficas en conjunto, igualando el espacio temporal, esto nos ayudó a visualizar la máxima intensidad de la tormenta y el estado del TEC durante la mayor intensidad.

Por otra parte, se elaboraron mapas ionosféricos a partir de los datos del TEC, para cada satélite es posible calcular el TEC a la altura de 350km, por lo tanto, los mapas se generaron a partir de los satélites visibles para el receptor. La zona a cubrir varía debido al movimiento de los satélites, para evitar mapas de diferentes dimensiones elegimos una zona en común para cualquier hora del día.

Los mapas representan el estado del TEC cuando se encuentra en mayor intensidad antes, durante y después del día del evento. La hora de los mapas varía, debido a que el TEC no siempre está en su mayor intensidad a la misma hora del día, y menos si está perturbado. Nos centramos en este momento, por que nos muestra que tanto perturbó la tormenta geomagnética a la ionosfera.

Los mapas se elaboraron con dimensiones específicas para la aplicación de la Función de Densidad de Probabilidad, la cual se aplicó con un script desarrollado en Matlab R2017b. Los mapas se realizaron para considerar la componente geográfica de los valores del TEC ya que es posible tener PDF similares con mapas con orientaciones diferentes de los datos, por lo cual se decidió implementar los mapas como apoyo a los resultados obtenidos. Utilizamos el método Kernel en la Función de Densidad de Probabilidad debido a la variabilidad de los histogramas de las imágenes, este método se adapta a los histogramas utilizando funciones que se ajustan a cada uno de los datos. Se decidió implementar el PDF para buscar patrones en los datos de los mapas que nos permitieran analizarlos de una mejor manera y buscar una posible alternativa para el estudio de este tipo de eventos.

Una vez teniendo estos datos se realizó el análisis de las gráficas, para cada evento geomagnético la ionosfera tiene perturbaciones, pueden ser negativas o positivas. El ciclo diurno sigue un conjunto de rangos dependiendo la estación del año en que se encuentre, de tal manera que, si el patrón aumenta se considera un impacto positivo o tormenta positiva en la ionosfera, si los valores disminuye es una tormenta negativa en la ionosfera, esto en relación a los valores registrados anteriormente y se puede ver reflejado a cualquier hora del día. Los valores máximos del TEC es otro parámetro importante a considerar ya que los valores no dependen de la intensidad de la tormenta geomagnética. De igual forma, el análisis del valor mínimo del índice Dst es importante, ya que, en diversas ocasiones los cambios reflejados en la ionosfera no ocurren exactamente durante la mayor intensidad de la tormenta geomagnética. También se consideró la posición del evento dentro del ciclo solar, por la relación que existe entre las manchas solares y las eyecciones de masa coronal. Además, se analizó el lugar del evento en el ciclo estacionario, debido a los cambios producidos en la ionosfera en cada estación del año, también se tomó en cuenta la hora local, para analizar el ciclo diurno y la hora con mayor intensidad de la tormenta geomagnética.

3.2. Área de estudio

Para la elaboración de este trabajo se utilizó la estación de INEGI, que forma parte de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), la cual se localiza en Aguascalientes, en las coordenadas $21^{\circ}51'22,15280''$ latitud norte y $102^{\circ}17'03,13231''$ longitud oeste y se denomina INEG (Figura 3.1). Los mapas realizados comprenden la región denominada área de estudio. La estación nos permite realizar mapas ionosféricos con diferentes dimensiones, el alcance varía dependiendo la geometría de los satélites, por lo cual, el área de estudio se eligió considerando una zona en común a cualquier hora. Por otra parte, utilizamos un índice Dst global para poder implementarlo en nuestra área de estudio.



Figura 3.1: Área de estudio.

3.3. Cálculo del TEC

El GPS nos brinda una visión sin precedentes del comportamiento del clima espacial y su influencia en la ionosfera terrestre ya que es una manera relativamente simple y económica, además de brindar una buena precisión; todo esto considerando la facilidad que existe hoy en día de tener un receptor GPS en prácticamente cualquier lugar, brindando una visión del cielo local las 24 horas del día. De esta manera se abre la posibilidad de realizar correcciones ionosféricas de una manera constante. Dicho lo anterior, se puede calcular el contenido total de electrones en la ionosfera por medio del GPS utilizando los archivos RINEX de observación (*.o) y de navegación (*.n) (López, 2010).

La frecuencia dual del sistema GPS, es un medio para verificar el efecto de la ionosfera en las señales del mismo sistema. De esta manera, se puede medir el grado de ionización entre la línea de visión del satélite al receptor, además de detectar centelleo ionosférico. El operar en dos frecuencias al mismo tiempo (L1 y L2), permite medir el retraso de fase relativo entre las dos señales, con lo que se determina el contenido total de electrones (TEC) (Eftaxiadis et al., 1999).

Básicamente el TEC se obtiene por medio de la medida de los códigos de pseudorange o por las mediciones de fase de la señal del GPS. La medición de la fase puede ser modelada por

$$\Phi = ((\rho/\lambda) + f)(\Delta\rho + N - (\Delta^{iono}/\lambda)) \quad (3.1)$$

donde ρ es el rango geométrico entre el satélite y el receptor, f es la frecuencia, λ es la longitud de onda, N es el número de ciclos y λ^{iono} es el retraso ionosférico. El modelo equivalente para éste código es

$$R = \rho + c\Delta\rho + \Delta^{trop} \quad (3.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y Δ^{trop} es el retraso troposférico. El número de ciclos N inicial entre el satélite y el receptor es

desconocido y esta ambigüedad de fase N permanece constante siempre y cuando no ocurra pérdida de la señal (Araujo-Pradere, 2005).

El grupo y la fase de índices de refracción para una onda electromagnética que se propaga en el espacio con frecuencia f y un grupo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes pueden ser aproximadas por $n_{gr} = 1 - (c^2/f^2)$ y $n_{ph} = 1 + (c^2/f^2)$, además de términos de orden superior, donde $c = -40,3N_e$, $TEC = \int N_e ds_0$, N_e es la densidad electrónica y TEC representa el contenido total de electrones.

La dispersión, o tiempo de retardo entre las señales de dos frecuencias, proporciona una medida de la integral de TEC a lo largo de la trayectoria de propagación. La medida del rango y del rango geométrico están definidos por $s = \int nds$ y $s_0 = \int ds_0$ y la diferencia entre ambos representa la refracción ionosférica $\Delta^{iono} = s - s_0$. De las fórmulas anteriores es posible obtener ambos retrasos: $\Delta_{gr}^{iono} = (40,3/f^2)TEC$ y $\Delta_{ph}^{iono} = (40,3/f^2)TEC$ (en metros).

Las ecuaciones de observación del GPS para el código del pseudorango son:

$$R_1 = \rho + c\Delta\rho + \Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f1}^S + b_{f1}^R + m_{R1} + \epsilon_{R1} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \rho + c\Delta\rho + \Delta_{f2}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f2}^S + b_{f2}^R + m_{R2} + \epsilon_{R2} \quad (3.4)$$

donde b_{f1}^S y b_{f2}^S son el retraso satelital; b_{f1}^R y b_{f2}^R el retraso del receptor; m_{R1} y m_{R2} los efectos multipath y ϵ_{R1} y ϵ_{R2} el ruido del receptor, todos obtenidos por el código de pseudorango observado.

Combinando las ecuaciones previas, se obtiene la expresión para el contenido total de electrones utilizando los pseudorangos observados:

$$TEC_R = 9,52(R_2 - R_1) \quad (3.5)$$

La cual es inambigua pero con ruido.

Las ecuaciones de observación del GPS por medio de la medición de la señal de fase son:

$$\lambda_1 \Phi_1 = \rho + c\Delta\rho + \lambda_1 N_1 - \Delta_{f_1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_1}^{S,\Phi} + b_{f_1}^{R,\Phi} + m_{\Phi_1} + \epsilon_{\Phi_1} \quad (3.6)$$

$$\lambda_2 \Phi_2 = \rho + c\Delta\rho + \lambda_2 N_2 - \Delta_{f_2}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_2}^{S,\Phi} + b_{f_2}^{R,\Phi} + m_{\Phi_2} + \epsilon_{\Phi_2} \quad (3.7)$$

Donde N_1 y N_2 son las ambigüedades desconocidas de la fase portadora; $b_{f_1}^{S,\Phi}$ y $b_{f_2}^{S,\Phi}$ el retraso satelital; $b_{f_1}^{R,\Phi}$ y $b_{f_2}^{R,\Phi}$ retraso del receptor; m_{Φ_1} y m_{Φ_2} efectos “multipath”; y finalmente ϵ_{Φ_1} y ϵ_{Φ_2} son el ruido del receptor; todos éstos términos provenientes de observaciones de la fase. De donde $b^S = b_{f_1}^{S,\Phi} - b_{f_2}^{S,\Phi}$ es el retraso diferencial del satélite, $b^R = b_{f_1}^{R,\Phi} - b_{f_2}^{R,\Phi}$ el retraso diferencial del receptor y $b^R + b^S$ es el retraso total satélite-receptor.

Combinando las ecuaciones previas, el contenido total de electrones utilizando la fase de la señal observada es:

$$TEC_{\Phi} = 9,52(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) \quad (3.8)$$

La cual es una ecuación precisa pero con ambigüedades. Ahora bien, el cálculo del TEC por medio de la fase nos provee de una excelente determinación de la variación del contenido de electrones como función del tiempo y el cálculo por medio de los pseudorángos nos da valores absolutos (Erickson et al., 2001).

3.4. Función de densidad de probabilidad (PDF)

La función de densidad de probabilidad ayuda a identificar regiones de mayores y menores probabilidades para valores de una variable aleatoria.

La función de densidad de probabilidad (PDF) $\mathbf{P}(\mathbf{x})$ de una distribución continua se define como la derivada de la función de distribución (acumulativa) $\mathbf{D}(\mathbf{x})$:

$$D'(x) = [P(x)]_{-\infty}^x \quad (3.9)$$

$$D'(x) = P(x) - P(-\infty) \quad (3.10)$$

$$D'(x) = P(x) \quad (3.11)$$

así que:

$$D(x) = P(X \leq x) \quad (3.12)$$

$$D(x) = \int_{-\infty}^x P(\xi) d\xi \quad (3.13)$$

Una función de probabilidad satisface:

$$P(x \in B) = \int_B P(x) dx \quad (3.14)$$

y está limitado por la condición de normalización,

$$P(-\infty < x < \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx \quad (3.15)$$

$$P(-\infty < x < \infty) = 1 \quad (3.16)$$

Los casos especiales son:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b P(x)dx \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} P(a \leq x \leq a + da) &= \int_a^{a+da} P(x)dx \quad (3.18) \\ &\approx P(a)da \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(x = a) &= \int_a^a P(x)dx \quad (3.19) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Abramowitz y Stegun (1965).

Capítulo 4

Resultados y análisis

Durante los eventos analizados es posible distinguir diferentes comportamientos en los resultados del TEC, índice Dst y PDF. El TEC es la componente que describe el estado en que se encuentra la ionosfera, el índice Dst describe el estado del campo geomagnético y el PDF nos muestra la distribución de los datos del mapa, en otras palabras la distribución de los datos del TEC, sin embargo, el PDF omite un complemento importante que solamente los mapas nos pueden ofrecer. Los mapas tienen la particularidad de mostrar visualmente los datos considerando una referencia geográfica, lo cual, nos permite saber en que zonas geográficas del área de estudio se encuentran los diferentes valores de TEC, los mapas de los eventos se pueden visualizar en la sección anexos.

El ciclo estacionario tiene una influencia importante en las variaciones del TEC, durante el invierno los rangos diarios del TEC van en ascenso, de tal manera que, al finalizar el invierno el TEC alcanza valores mayores que cuando iniciaba el invierno, esto considerando que no hay perturbaciones importantes. En primavera los rangos diarios descienden, posteriormente en verano los rangos van en ascenso y en otoño de nuevo descienden.

Los eventos analizados tiene relación con el ciclo solar, cada una de las tormentas geomagnéticas intensas fue provocada por eventos energéti-

cos solares, sin embargo, la intensidad del evento no tiene relación con la época del ciclo solar, se sabe que a mayor cantidad de manchas solares hay más probabilidad de que haya tormentas geomagnéticas, pero, la intensidad de dichos eventos no están relacionadas con la cantidad de manchas solares, dicho esto es posible que ocurra un evento muy energético incluso cuando el ciclo solar este en su mínimo de manchas solares.

La Figura 4.1 nos muestra el ciclo solar 24, cuando hablamos de las manchas solares es común representarlas por día, media mensual y mensual suavizado, la media mensual suavizada se genera para tener una mejor interpretación del ciclo, osea visualizar de mejor manera las tendencias del ciclo. Los eventos están posicionados considerando el tiempo en que sucedieron, permitiéndonos destacar la intensidad del evento y la posición que ocupa en el ciclo solar 24. Es posible apreciar que durante el inicio del ciclo no hubo eventos intensos y al finalizar el ciclo los eventos son relativamente pocos. Los eventos se centran durante la mayor actividad solar (mayor cantidad de manchas solares), lo cual nos indica que a mayor cantidad de eventos solares mayor cantidad de tormentas geomagnéticas, sin embargo, como ya se menciono anteriormente la intensidad no depende del ciclo solar, lo cual es posible comprobar en la Figura (4.1).

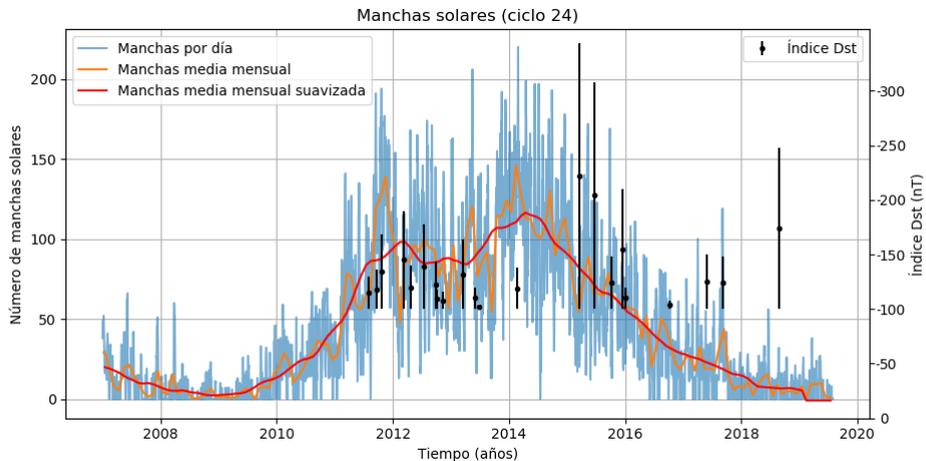


Figura 4.1: Ciclo solar 24.

Los eventos (Tabla 4.1) tienen su mayor intensidad durante distintas horas del día, esto provoca diferentes variaciones en la ionosfera, cuando el evento sucede durante el día el viento solar impacta directamente sobre la zona de estudio provocando alteraciones inmediatas, caso contrario, si el evento sucede de noche, el evento tiene que ser muy fuerte para impactar en la ionosfera durante la noche, pero es posible, por ello la importancia del ciclo diurno durante los eventos, por ello documentamos la hora con mayor intensidad del índice Dst.

Tabla 4.1: Eventos analizados.

| Evento | Año | Mes | Día | Índice Dts (nT) | Hora de mayor intensidad índice Dst (UTC) |
|--------|------|------------|-----|-----------------|---|
| 1 | 2011 | Agosto | 6 | -115 | 4:00 hrs |
| 2 | | Septiembre | 26 | -118 | 24:00 hrs |
| 3 | | Octubre | 25 | -147 | 2:00 hrs |
| 4 | 2012 | Marzo | 9 | -145 | 9:00 hrs |
| 5 | | Abril | 24 | -120 | 5:00 hrs |
| 6 | | Julio | 15 | -139 | 17:00 hrs |
| 7 | | Octubre | 1 | -122 | 5:00 hrs |
| 8 | | Octubre | 9 | -109 | 9:00 hrs |
| 9 | | Noviembre | 14 | -108 | 8:00 hrs |
| 10 | 2013 | Marzo | 17 | -132 | 21:00 hrs |
| 11 | | Junio | 1 | -124 | 9:00 hrs |
| 12 | | Junio | 29 | -102 | 7:00 hrs |
| 13 | 2014 | Febrero | 19 | -119 | 9:00 hrs |
| 14 | 2015 | Marzo | 17 | -222 | 23:00 hrs |
| 15 | | Junio | 23 | -204 | 5:00 hrs |
| 16 | | Octubre | 7 | -124 | 23:00 hrs |
| 17 | | Diciembre | 20 | -155 | 23:00 hrs |
| 18 | 2016 | Enero | 1 | -110 | 1:00 hrs |
| 19 | | Octubre | 13 | -104 | 24:00 hrs |
| 20 | 2017 | Mayo | 28 | -125 | 8:00 hrs |
| 21 | | Septiembre | 8 | -124 | 2:00 hrs |
| 22 | 2018 | Agosto | 26 | -174 | 7:00 y 8:00 hrs |

El TEC varía con diferentes rangos en cada uno de los eventos, estos se reflejan en las gráficas PDF, la Tabla 4.2 nos muestran los rangos que tiene el TEC antes, durante y después de cada evento, el promedio de estos valores es un indicador de la densidad del TEC para el evento, sin embargo el promedio no tiene tanta relevancia como la desviación estándar, a partir de la desviación estándar es posible determinar cual evento tuvo mayor perturbaciones en la ionosfera.

Tabla 4.2: Rangos (TEC) de los días analizados, antes, durante y después del evento.

| Evento | Antes | | Durante | | Después | | Promedio | Desviación estándar |
|--------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|---------------------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | | |
| 1 | 21.37 | 27.80 | 12.14 | 20.36 | 15.19 | 20.90 | 19.62 | 5.44 |
| 2 | 34.76 | 45.45 | 72.15 | 79.61 | 34.79 | 42.88 | 51.61 | 19.43 |
| 3 | 52.13 | 55.75 | 52.14 | 73.43 | 36.72 | 45.55 | 52.62 | 12.22 |
| 4 | 38.24 | 45.31 | 20.59 | 30.71 | 40.48 | 49.84 | 37.53 | 10.53 |
| 5 | 51.92 | 59.27 | 34.69 | 50.32 | 35.34 | 56.03 | 47.93 | 10.48 |
| 6 | 44.00 | 51.75 | 18.68 | 41.70 | 13.73 | 17.87 | 31.29 | 16.35 |
| 7 | 52.91 | 61.61 | 29.89 | 36.11 | 35.66 | 43.54 | 43.29 | 11.98 |
| 8 | 35.07 | 42.68 | 34.44 | 39.74 | 31.56 | 41.92 | 37.57 | 4.51 |
| 9 | 31.71 | 37.70 | 44.59 | 54.94 | 26.67 | 30.84 | 37.74 | 10.48 |
| 10 | 34.22 | 43.80 | 66.29 | 80.93 | 29.72 | 41.17 | 49.35 | 19.98 |
| 11 | 39.02 | 49.40 | 15.54 | 20.68 | 21.99 | 28.50 | 29.19 | 12.78 |
| 12 | 41.44 | 52.75 | 11.10 | 14.26 | 28.36 | 35.95 | 30.64 | 16.06 |
| 13 | 43.69 | 52.07 | 57.17 | 65.00 | 43.53 | 50.08 | 51.92 | 8.25 |
| 14 | 34.18 | 39.24 | 36.03 | 60.69 | 47.50 | 56.99 | 45.77 | 11.16 |
| 15 | 42.56 | 55.59 | 25.46 | 30.86 | 24.06 | 34.05 | 35.43 | 11.91 |
| 16 | 31.78 | 40.05 | 56.92 | 71.80 | 19.61 | 28.10 | 41.38 | 19.55 |
| 17 | 24.02 | 30.45 | 40.87 | 49.16 | 23.72 | 37.02 | 34.20 | 10.04 |
| 18 | 26.46 | 31.40 | 18.45 | 28.50 | 19.41 | 22.58 | 24.46 | 5.17 |
| 19 | 18.39 | 23.12 | 49.57 | 55.99 | 26.31 | 34.79 | 34.69 | 15.13 |
| 20 | 25.58 | 36.33 | 11.98 | 19.88 | 15.07 | 20.43 | 21.54 | 8.63 |
| 21 | 21.32 | 30.21 | 12.74 | 21.13 | 17.56 | 23.61 | 21.09 | 5.86 |
| 22 | 22.43 | 31.69 | 8.60 | 11.09 | 15.12 | 20.39 | 18.22 | 8.45 |

Los eventos cuentan con diferentes características importantes, tales como la estación del año en que suceden, lo cual se describe como el ciclo estacionario, dichas estaciones cuentan con diferentes rangos del TEC, durante la estación de invierno y verano dichos rangos aumentan, teniendo un comportamiento ascendente desde que inicia la estación del año hasta que termina, caso contrario las estaciones de primavera y verano las cuales disminuyen los rangos respecto va pasando la estación. Otro factor importante es la hora en que sucede la tormenta ya que si sucede durante el día debería tener diferente comportamiento a la noche, sin embargo, para las tormentas analizadas el ciclo diurno no

tiene impacto notable en los diferentes eventos. Además, se consideró el impacto que generó la tormenta en la ionosfera, ya sea positivo o negativo, esto considerando los rangos que toma el TEC en las distintas épocas del año (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Ciclos durante el evento e impacto correspondiente en la ionosfera.

| Evento | Estación | Ciclo | Tipo de tormenta |
|---------------|-----------------|--------------|-------------------------|
| 1 | Verano | Noche | - |
| 2 | Otoño | Día | + |
| 3 | Otoño | Noche | + |
| 4 | Invierno | Noche | - |
| 5 | Primavera | Noche | - |
| 6 | Verano | Día | - |
| 7 | Otoño | Noche | - |
| 8 | Otoño | Noche | +,- |
| 9 | Otoño | Noche | + |
| 10 | Invierno | Día | + |
| 11 | Primavera | Noche | - |
| 12 | Verano | Noche | - |
| 13 | Invierno | Noche | + |
| 14 | Invierno | Día | + |
| 15 | Verano | Noche | +,- |
| 16 | Otoño | Día | + |
| 17 | Otoño | Día | + |
| 18 | Invierno | Noche | +,- |
| 19 | Otoño | Día | + |
| 20 | Primavera | Noche | +,- |
| 21 | Verano | Noche | - |
| 22 | Verano | Noche | - |

| | |
|-------------------|---|
| Invierno y verano | Ascendente |
| Primavera y otoño | Descendente |
| - | Tormenta con impacto negativo en la ionosfera |
| + | Tormenta con impacto positivo en la ionosfera |
| +,- | Tormenta con impacto negativo y positivo |

Las gráficas de los eventos se realizaron implementando 4 días, considerando el eje X diariamente, esto para garantizar el análisis de los datos de antes, durante y después del evento en hora local de donde se encuentra la estación. las líneas rojas horizontales dividen los 3 días en hora local, mientras que lo verde muestra los días analizados en hora local, a su vez, agregamos la desviación estándar (STD) de la obtención de los valores del TEC, que nos ayuda a corroborar el comportamiento de los resultados del PDF.

4.1. Evento 1 (6 de agosto 2011)

La tormenta del 6 de agosto de 2011 alcanzó un valor del índice Dst de -115 nT, por lo tanto, es considerada como una tormenta intensa, dicha perturbación se presentó durante las 4:00hrs UTC. Provocó perturbaciones negativas en la ionosfera, un día de su fase máxima la ionosfera alcanzó valores del TEC de 35.34 TECU, mientras que, durante la tormenta y después de esta se alcanzó valores de 16.91 y 18.42 TECU. La Figura 4.2 muestra la gráfica del TEC e índice Dst para el evento en cuestión.

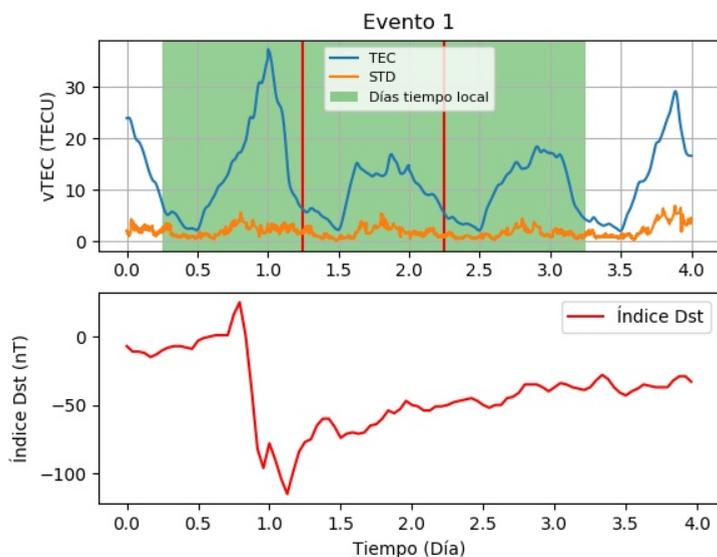


Figura 4.2: Evento 1 (6 de agosto 2011).

La Figura 4.3 muestra los resultados del PDF para los mapas, en la cual es posible apreciar los rangos que tomaron los valores del TEC antes del evento, durante y después. Teniendo como valor máximo hasta 28 TECU en la región analizada y 12 TECU como valor mínimo lo cual nos dice que de manera general la tormenta provocó variaciones de hasta 16 TECU en la región, en este caso es posible percibir que los valores máximos del PDF no corresponden a los valores máximos de la estación esto debido a que la estación considera los valores de toda la región que cubren los satélites.

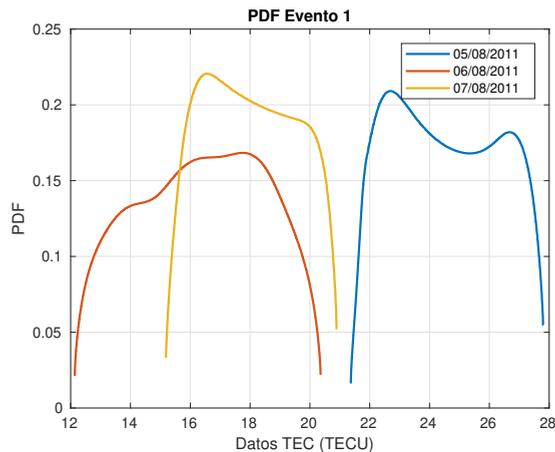


Figura 4.3: PDF Evento 1 (6 de agosto 2011).

4.2. Evento 2 (26 de septiembre 2011)

La tormenta del 26 de septiembre de 2011 fue la que provocó mayores alteraciones en la ionosfera, alcanzando valores del TEC de 77.32 TECU durante la tormenta, antes de la tormenta el TEC incrementó hasta 40.01 TECU y después de la tormenta 39.29 TECU teniendo una recombinación ionosférica casi inmediata. Lo cual indica que se trata de una tormenta ionosférica positiva. La tormenta geomagnética alcanzó valores de -118 nT lo cual a pesar de ser una tormenta intensa no es-

tuvo tan perturbada como otras del mismo ciclo solar. La Figura 4.4 muestra lo antes comentado respecto al TEC y el índice geomagnético.

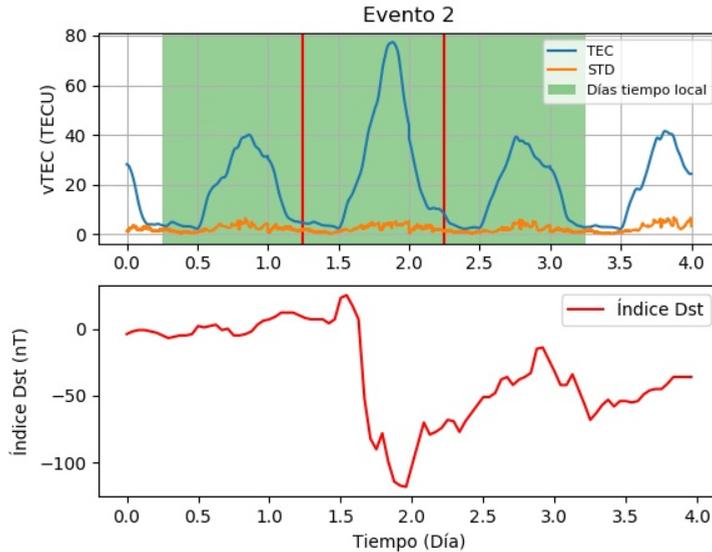


Figura 4.4: Evento 2 (26 de septiembre 2011).

Para el evento 2, los resultados del PDF (Figura 4.5) muestran una clara alteración, pero además de eso, es posible apreciar que dicha alteración se realizó de manera uniforme en toda la región de estudio, esto considerando que antes y después del evento el TEC en la región varía de 35 a 45 TECU, mientras que, durante el día del evento se registraron valores mínimos de 72.5 y máximos de 80 TECU.

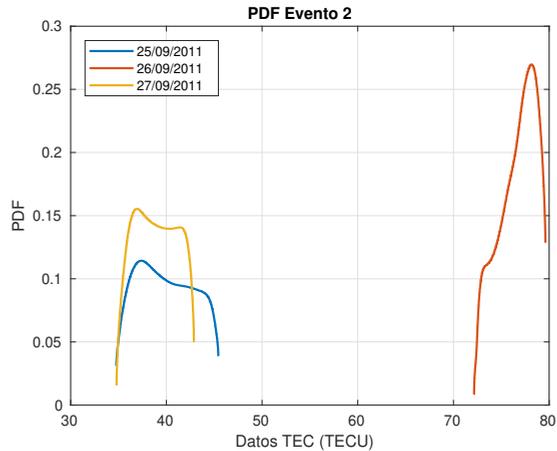


Figura 4.5: PDF Evento 2 (26 de septiembre 2011).

4.3. Evento 3 (25 de octubre 2011)

El 25 de octubre de 2011 se registró la tormenta geomagnética más fuerte del 2011, la cual, alcanzó valores de -134 nT su mayor intensidad se registró a las 6:00hrs UTC. Dicha tormenta provocó perturbaciones positivas en la ionosfera, en la Figura 4.6 es posible observar dichas perturbaciones, así como también, un incremento de la desviación estándar. La mayor dispersión de los datos no se encuentra cuando la tormenta esta más intensa, en este caso se presenta cuando el campo geomagnético se encuentra en recuperación. Antes de la tormenta el TEC incrementó hasta 55.75 TECU, pero, durante el evento aumentó hasta los 73.43 TECU y posteriormente disminuyó a 45.55 TECU en su mayor aumento del ciclo diurno.

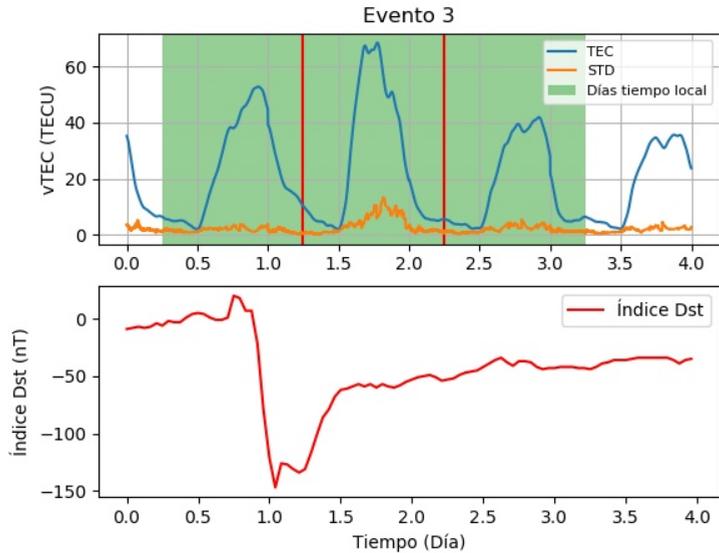


Figura 4.6: Evento 3 (25 de octubre 2011).

Los resultados del PDF para el evento del día 25 de octubre de 2011 (Figura 4.7) muestran el aumento del TEC en la región de estudio, pero, en una pequeña región los valores del día anterior se conservan esto debido a que el día anterior a la tormenta los valores del TEC en la región eran muy uniformes, a diferencia del día 25 de octubre que presenta un rango mucho mayor, lo cual nos indica una mayor variación en la zona. Antes del evento los valores del TEC en la zona variaban de 52.13 a 55.75 TECU, durante el evento 52.14 a 73.43 TECU y después del evento de 36.72 a 45.55 TECU.

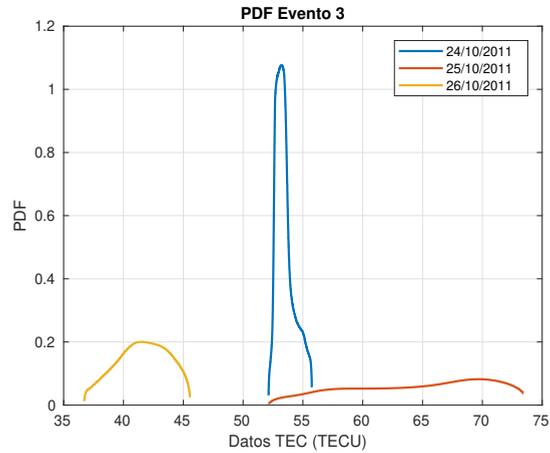


Figura 4.7: PDF Evento 3 (25 de octubre 2011).

4.4. Evento 4 (9 de marzo 2012)

El evento del día 9 de marzo de 2012 tuvo una intensidad de -145 nT, alcanzando su mayor intensidad a las 9:00hrs UTC. Fue una de las tormentas más intensas del ciclo solar 24, ocupando la quinta posición, sin embargo, a pesar de ser tan intensa presentó perturbaciones negativas en la ionosfera (Figura 4.8). Antes del evento el TEC en la zona alcanzó valores de 45.31 TECU, durante el evento 30.71 TECU debido al impacto negativo que se tuvo en este evento y después de la tormenta el TEC incrementó hasta 49.85 TECU los cual nos indica la recuperación de la ionosfera después del evento.

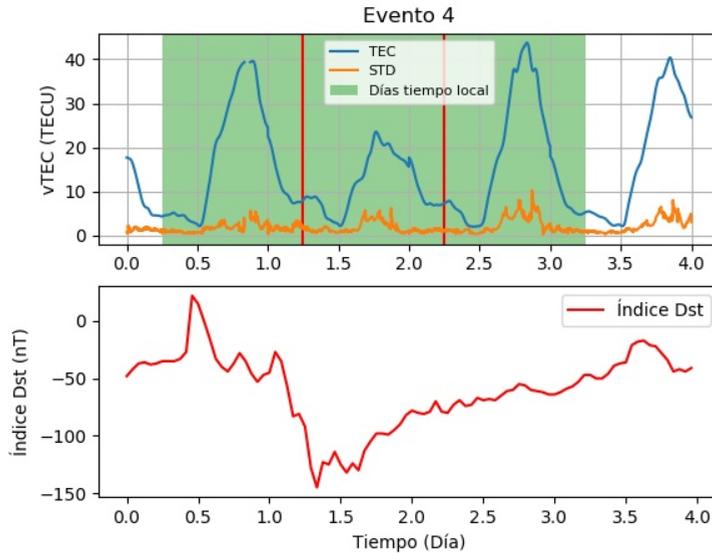


Figura 4.8: Evento 4 (9 de marzo 2012).

En el PDF (Figura 4.9) es posible apreciar el cambio en los rangos durante el evento, considerando que después del evento los rangos aumentaron, lo cual significa mayor variación del TEC en la región, pero la ionosfera se recuperó al día siguiente de la tormenta con rangos similares a un día antes de la tormenta, lo cual nos indica que el impacto negativo se registró solamente durante la tormenta. Antes de la tormenta el TEC variaba de 38.24 a 45.31 TECU, sin embargo, durante el evento los valores disminuyeron (20.59 a 30.71 TECU) y posteriormente aumentaron (40.48 a 49.84 TECU).

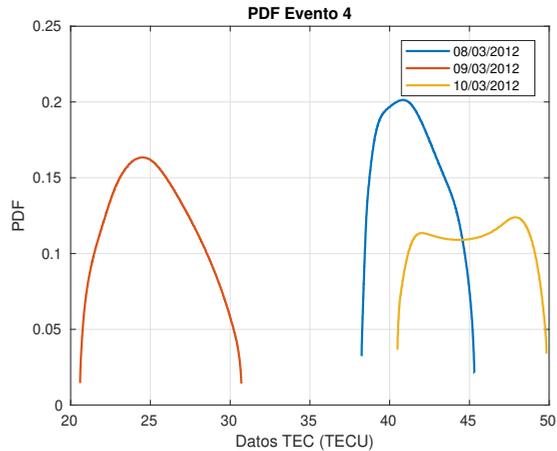


Figura 4.9: PDF Evento 4 (9 de marzo 2012).

4.5. Evento 5 (24 de abril 2012)

La tormenta del 24 de abril de 2012 alcanzó valores de -120 nT y tuvo impacto negativo en la ionosfera, un día antes de la tormenta el rango de valores era más pequeño y los valores eran más elevados lo cual nos indica una distribución sin tantas variaciones en la zona, sin embargo, durante y después de la tormenta los rangos aumentaron. En la Figura 4.10 se aprecia la lenta recuperación del campo magnético, lo cual, a su vez sigue siendo reflejado en la recombinación de la ionosfera. Antes del evento el TEC en la zona alcanzó valores de 59.29 TECU, durante el evento 50.32 TECU y después del evento 56.03 TECU.

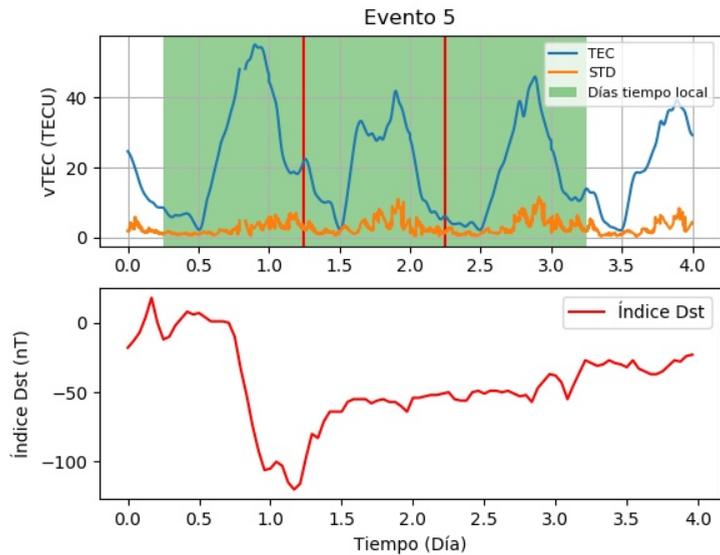


Figura 4.10: Evento 5 (24 de abril 2012).

En la Figura 4.11 se muestra el resultado del PDF para el evento del 24 de abril de 2012, en el cual es posible apreciar la distribución del TEC en la ionosfera de la zona de estudio. Se aprecia el impacto negativo en la ionosfera y que rango de valores se alcanzaron en la zona, antes del evento 51.92 a 59.27 TECU, durante el evento 34.69 a 50.32 TECU y después del evento 35.34 a 56.03 TECU.

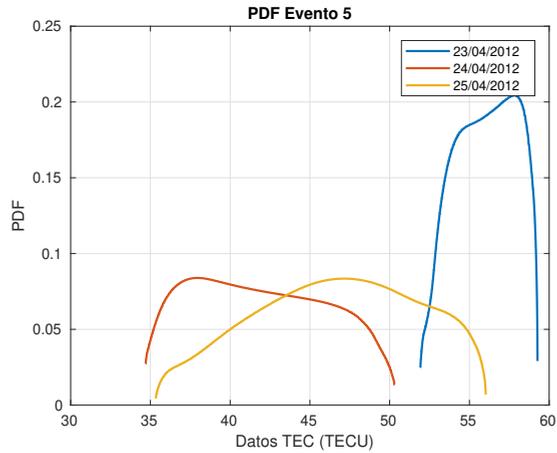


Figura 4.11: PDF Evento 5 (24 de abril 2012).

4.6. Evento 6 (15 de julio 2012)

El comportamiento del TEC durante el evento del 15 de junio de 2012 tiene un comportamiento muy particular. La recombinación de la ionosfera fue muy lenta, incluso, en la noche el TEC llegó a ser mayor que durante el día (Figura 4.12). Además, a pesar de las perturbaciones negativas durante el día después de la tormenta la distribución estuvo de manera uniforme lo cual se puede apreciar a través de los rangos mostrados en el PDF (Figura 4.13). La tormenta geomagnética alcanzó valores de -139 nT.

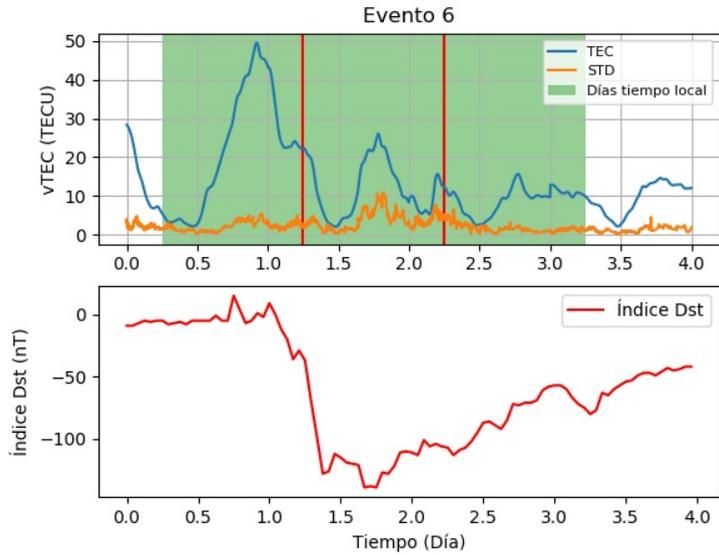


Figura 4.12: Evento 6 (15 de julio 2012).

Durante y después de la tormenta se registró una notable disminución en los valores del TEC para la zona de estudio, sin embargo, a pesar de la disminución de la intensidad de la tormenta geomagnética la ionosfera seguía sin recuperarse, incluso a pesar de tener valores más uniformes en la zona seguía con valores relativamente bajos. Antes de la tormenta el TEC en la zona variaba de 44.00 a 51.75 TECU, durante el evento los rangos aumentaron en la zona, teniendo una variación de 18.68 a 41.70 TECU y después de la tormenta de 13.73 a 18.87 TECU lo cual nos demuestra la lenta recuperación de la ionosfera.

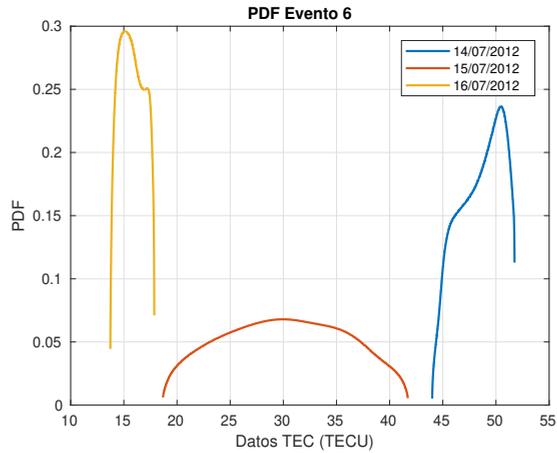


Figura 4.13: PDF Evento 6 (15 de julio 2012).

4.7. Evento 7 (1 de octubre 2012)

La tormenta del 1 de octubre de 2012 generó un impacto negativo en la ionosfera, la tormenta geomagnética se encontraba más intensa (-122 nT) durante la noche, sin embargo, es posible apreciar un aumento en el TEC justo cuando la tormenta geomagnética estaba intensa a pesar de ocurrir en la noche (Figura 4.14). Pero, a pesar de dicho aumento el evento tuvo un impacto negativo en la ionosfera durante el día alcanzando un máximo de 33.38 TECU, mientras que para el día anterior y después de esta se alcanzaron valores de 53.78 y 38.33 TECU respectivamente.

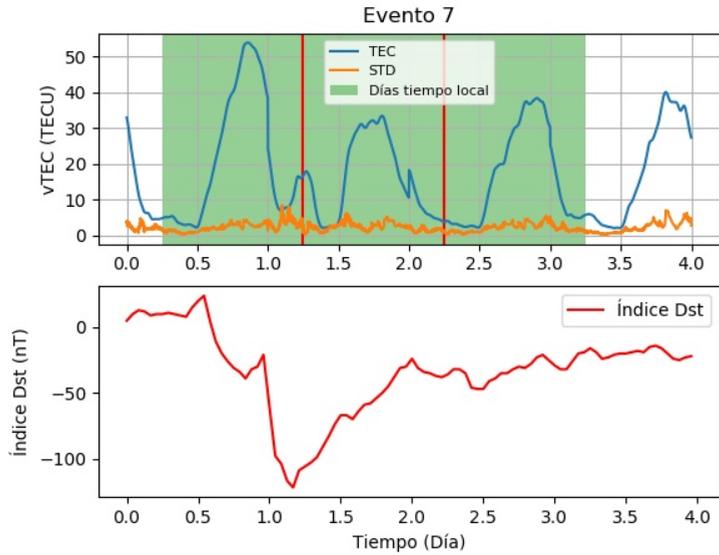


Figura 4.14: Evento 7 (1 de octubre 2012).

En los resultados del PDF (Figura 4.15) es posible apreciar la recuperación de la ionosfera acorde al aumento de los rangos después de que sucede la tormenta. Además, es posible apreciar el impacto negativo que se tuvo durante este evento, antes del evento los rangos en la zona variaban de 52.91 a 61.61 TECU, durante el evento de 29.89 a 36.10 TECU y después del evento de 35.65 a 43.53 TECU.

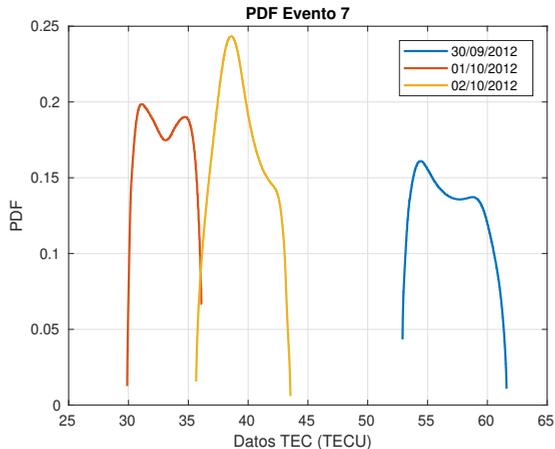


Figura 4.15: PDF Evento 7 (1 de octubre 2012).

4.8. Evento 8 (9 de octubre 2012)

El comportamiento del índice Dst (Figura 4.16) nos indica que la tormenta geomagnética inicio el 8 de octubre de 2012, sin embargo, fue hasta el 9 de octubre de 2012 que alcanzó su mayor intensidad (-109 nT), con los datos analizados observamos que la tormenta tiene efectos negativos en la ionosfera, de tal manera que, de los tres días analizados el primer día el TEC aumento hasta 39.94 TECU, cuando la tormenta geomagnética alcanzó su máxima intensidad (36.89 TECU) generó anomalías en la ionosfera que se manifestaron con un aumento del TEC durante la noche. Después de la tormenta el TEC tuvo 33.10 TECU en su máxima intensidad diaria, dicho esto se observa que la ionosfera tuvo impacto negativos, pero, ya estaba perturbada por la tormenta un día antes del día con mayor intensidad, para estos casos es recomendable analizar el evento con mayor cantidad de datos.

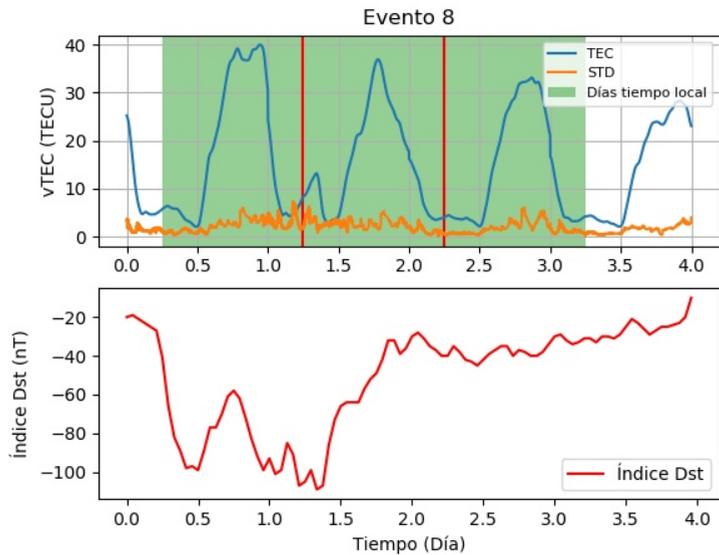


Figura 4.16: Evento 8 (9 de octubre 2012).

En la Figura 4.17 es posible apreciar que los resultados del PDF nos indican un impacto negativo en la ionosfera, pero, los rangos de los 3 días tienen valores en común, antes de la tormenta los valores del TEC en la zona variaban de 35.07 a 42.67 TECU, durante el día de mayor intensidad del evento el TEC varió de 34.43 a 39.74 TECU y después de la tormenta de 31.55 a 41.92 TECU.

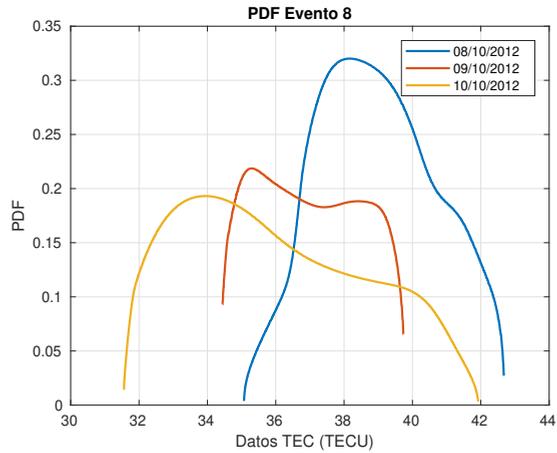


Figura 4.17: PDF Evento 8 (9 de octubre 2012).

4.9. Evento 9 (14 de noviembre 2012)

El evento del 14 de noviembre de 2012 (Figura 4.18), alcanzó valores de -108 nT en su máxima intensidad, el cual, se registró a las 8:00hrs UTC y tuvo un impacto positivo en la ionosfera, antes del evento el TEC incrementó hasta 37.70 TECU, durante el evento 54.94 TECU, lo cual nos indica un incremento de 17.24 TECU en la región y después de la tormenta se registró un máximo de 30.84 TECU.

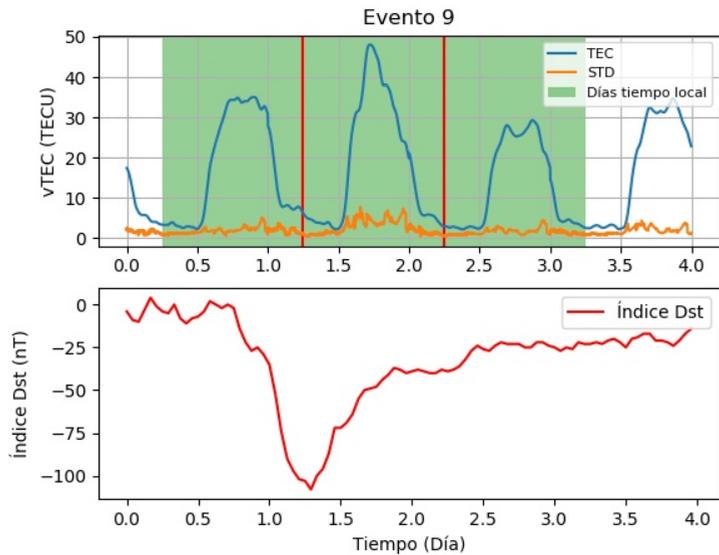


Figura 4.18: Evento 9 (14 de noviembre 2012).

Los resultados del PDF (Figura 4.19) para el evento del 14 de noviembre de 2012 nos muestran el aumento en los rangos durante la máxima intensidad de la tormenta geomagnética, antes de la tormenta el TEC en la zona variaba de 31.71 a 37.70 TECU, durante la tormenta de 44.59 a 54.94 TECU y después de la tormenta 26.67 a 30.84 TECU.

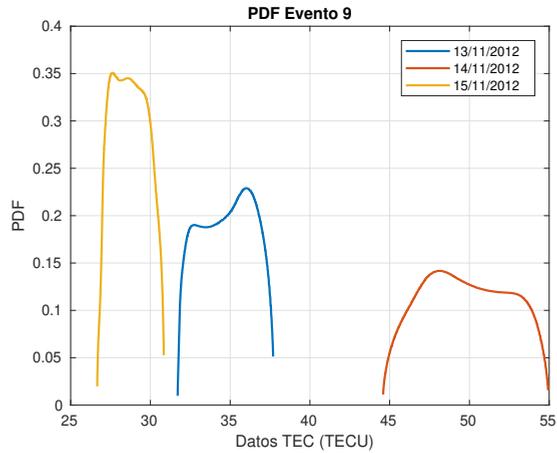


Figura 4.19: PDF Evento 9 (14 de noviembre 2012).

4.10. Evento 10 (17 de marzo 2013)

En la Figura 4.20 se muestran los resultados del índice Dst y el TEC durante la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2013, la cual, alcanzó una intensidad máxima de -132 nT a las 21:00hrs UTC. La tormenta tuvo un impacto positivo en la ionosfera, durante la tormenta se alcanzaron valores de hasta 80.93 TECU en la zona, 37.13 TECU más que el día anterior a la tormenta, sin embargo debido a la pronta recuperación de la ionosfera para el día después de la tormenta el TEC incrementó hasta 41.17 TECU valores similares al del día anterior de la tormenta (43.80 TECU).

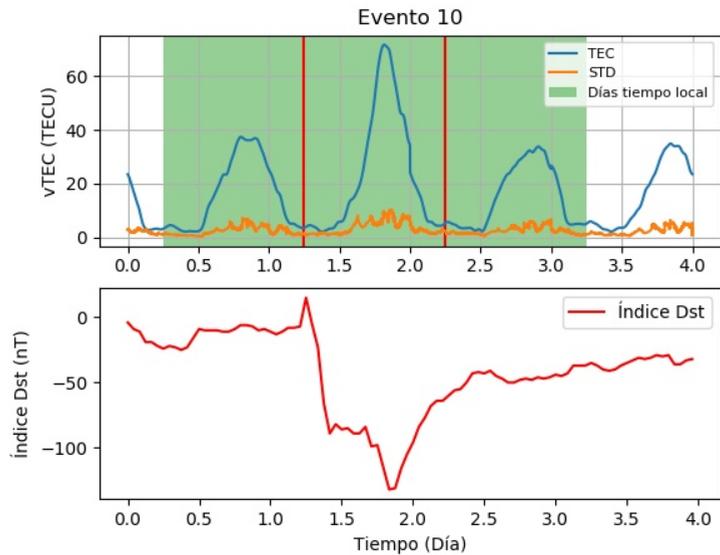


Figura 4.20: Evento 10 (17 de marzo 2013).

Los resultados del PDF para la tormenta del 17 de marzo de 2013 (Figura 4.21) nos muestran el impacto positivo que se tuvo en la zona durante el evento, además es posible apreciar la pronta recuperación de la ionosfera después del evento. Un día antes del evento los valores del TEC en la región variaban de 34.22 a 43.80 TECU, mientras que, durante el evento se alcanzaron valores de 66.29 a 80.93 TECU, pero después de la tormenta los rangos en la región volvieron a la normalidad para ese período, alcanzando valores de 29.72 a 41.17 TECU.

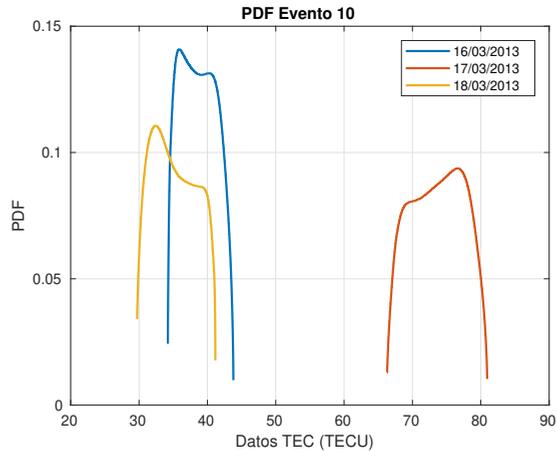


Figura 4.21: PDF Evento 10 (17 de marzo 2013).

4.11. Evento 11 (1 de junio 2013)

La tormenta del 1 de junio de 2013 (Figura 4.22) tiene un impacto muy particular en la ionosfera, durante la noche la tormenta alcanzó su mayor intensidad de tal manera que durante el día no alcanzó la recombinación que por lo regular se muestra en el TEC debido a su ciclo diurno, además de generar un impacto negativo, provocó una lenta recuperación de la misma. Dicho evento alcanzó valores de -124 nT durante las 9:00hrs UTC. Antes del evento el TEC incrementó hasta 49.40 TECU, durante el evento 20.69 TECU y después del día del evento 28.50 TECU.

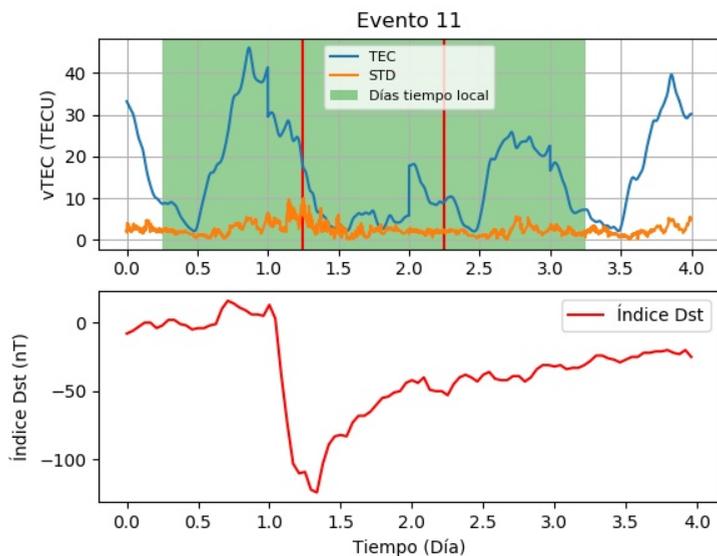


Figura 4.22: Evento 11 (1 de junio 2013).

En la Figura 4.23 se muestran los resultados del PDF para la tormenta del 1 de junio de 2013 en los cuales se aprecia el impacto negativo que tuvo la tormenta en la zona de estudio, disminuyendo considerablemente los rangos del TEC, antes de la tormenta el TEC variaba de 39.02 a 49.40 TECU, durante la tormenta 15.54 a 20.68 TECU y después de la tormenta de 21.99 a 28.50 TECU. A partir de los rangos del PDF para cada día es posible apreciar las perturbaciones negativo en la ionosfera, sin embargo, no es posible apreciar la baja concentración de electrones durante el día.

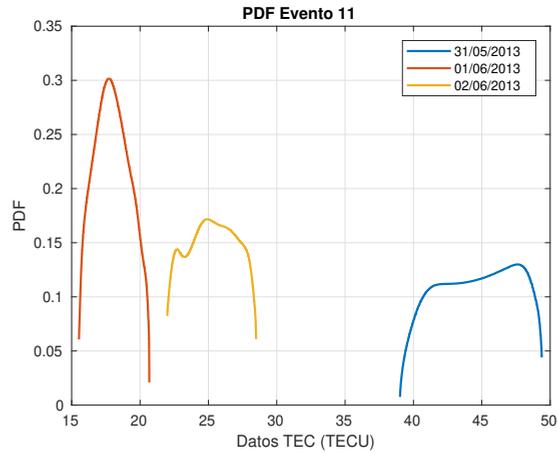


Figura 4.23: PDF Evento 11 (1 de junio 2013).

4.12. Evento 12 (29 de junio 2013)

Los resultados del TEC y el índice Dst para la tormenta del 29 de junio de 2013 se muestran en la Figura 4.24 en la cual se aprecia el impacto negativo que tuvo la tormenta en el TEC, alcanzó su mayor intensidad (-102 nT) a las 7:00hrs UTC. La mayor intensidad se presentó durante la noche, de tal manera que, para este caso la tormenta no permitió que la ionosfera se recuperara adquiriendo así valores relativamente bajos durante el día, además, durante la noche que se presentaba la tormenta hubo un pequeño aumento del TEC que se aprecia al finalizar el día 28 de junio de 2013, en este día el TEC en la zona alcanzó valores de 52.75 TECU, durante la tormenta 14.26 TECU y después de la tormenta 35.95 TECU.

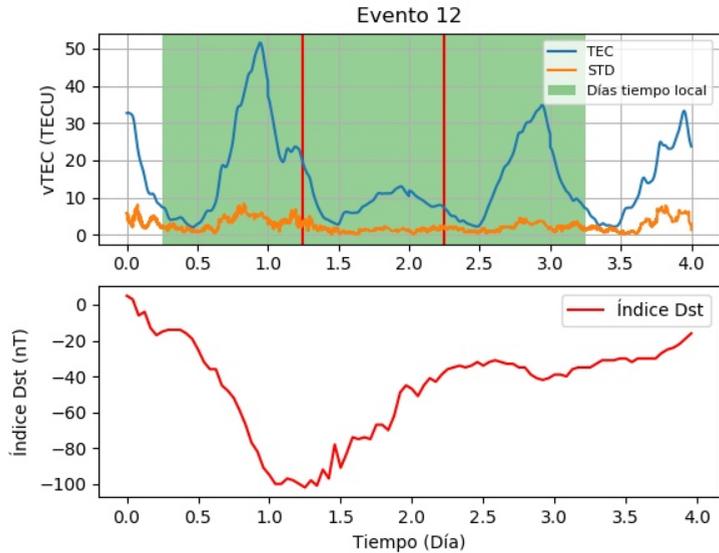


Figura 4.24: Evento 12 (29 de junio 2013).

Durante el evento del 29 de junio de 2013 los resultados del PDF (Figura 4.25) muestran el impacto negativo que tiene el TEC en la zona, además, es posible apreciar el rango que toma los valores, lo cual nos indica la poca variabilidad del TEC que se tuvo durante el evento, considerando esto, los valores del TEC durante la tormenta variaron de 11.10 a 14.26 TECU, los cuales son valores relativamente bajos comparados con los valores que se tenían un día antes del evento (41.44 a 52.75 TECU), sin embargo para el día después del evento los valores del TEC en la zona ya presentaban una recuperación (28.36 a 35.95 TECU).

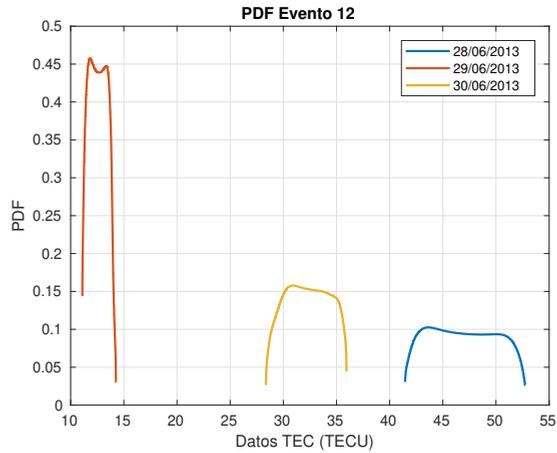


Figura 4.25: PDF Evento 12 (29 de junio 2013).

4.13. Evento 13 (19 de febrero 2014)

El día 19 de febrero de 2014 se presentó una tormenta geomagnética la cual alcanzó valores de -119 nT en su mayor intensidad durante las 9:00hrs UTC. Presentó un aumento del TEC durante la tormenta, pero, a pesar de que el campo geomagnético continuó perturbado, la ionosfera ya no presentó anomalías, teniendo un comportamiento muy similar al día antes de la tormenta, un día antes de la tormenta el TEC incrementó hasta 52.07 TECU, durante la tormenta 65.00 TECU, mientras que, después de la tormenta 50.08 TECU. Cabe mencionar que este evento sucedió cuando había la mayor cantidad de manchas solares para el ciclo solar 24.

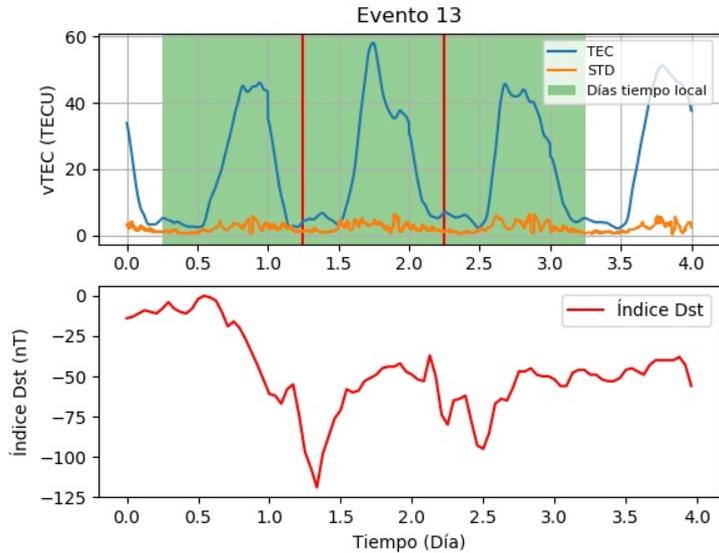


Figura 4.26: Evento 13 (19 de febrero 2014).

La Figura 4.27 nos muestra el resultado del PDF para el evento del 19 de febrero de 2014, en el cual se aprecia el impacto positivo que se tiene en la ionosfera durante el evento y también la pronta recuperación de la ionosfera, esto a pesar de la continuidad de la tormenta, cabe destacar que a pesar de que el campo geomagnético seguía alterado los valores que alcanzaba no son suficientes para considerar que la tormenta continuaba como intensa ya que había bajado a tormenta moderada. El TEC en la zona variaba de 43.69 a 52.07 TECU antes de la tormenta, de 57.17 a 65.00 TECU durante la tormenta y de 43.53 a 50.08 TECU después.

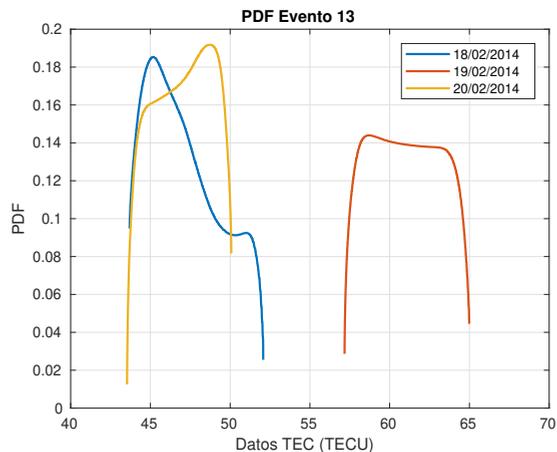


Figura 4.27: PDF Evento 13 (19 de febrero 2014).

4.14. Evento 14 (17 de marzo 2015)

La tormenta del 17 de marzo de 2015 fue la más intensa del ciclo solar 24, con un índice Dst de -222 nT, esta sucedió cuando el ciclo solar iba en descenso y tubo perturbaciones muy particulares, cuando la tormenta geomagnética estaba en su mayor intensidad el TEC disminuyo a medio día y aumento durante la tarde (Figura 4.28). El día antes del evento el TEC incrementó hasta 39.24 TECU, durante el evento 60.69 TECU y después del evento 56.99 TECU, el día después del evento también estuvo fuertemente perturbado por la tormenta, ya que el campo geomagnético seguía en recuperación después de la tormenta tan intensa.

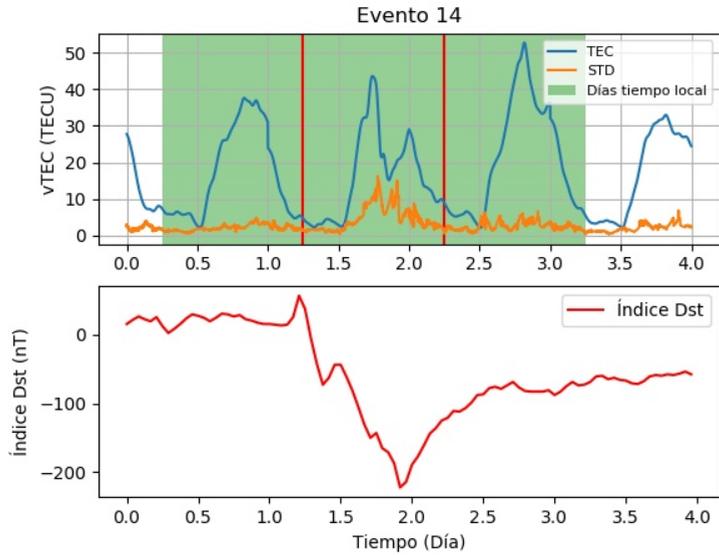


Figura 4.28: Evento 14 (17 de marzo 2015).

Los resultados del PDF (Figura 4.29) para el evento del 17 de marzo de 2015 nos muestran el claro impacto que se tiene en la zona debido a la tormenta tan intensa, los valores del TEC además de tener una gran variación en la zona dicha variación tuvo valores muy altos, durante la tormenta el TEC en la zona alcanzó valores de 36.03 a 60.69 TECU, mientras que antes de la tormenta se tenían valores de 34.18 a 39.24 TECU y después de la tormenta de 47.50 a 56.99 TECU.

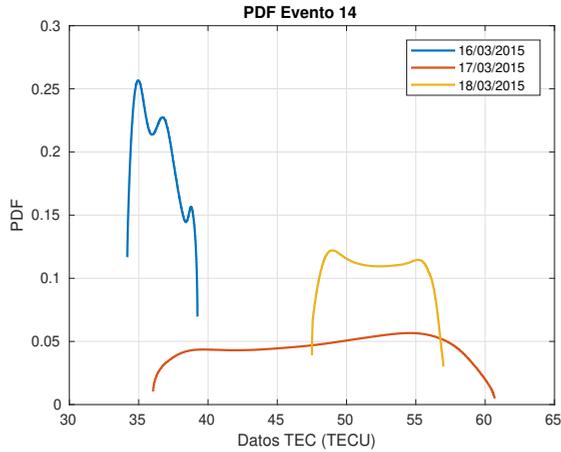


Figura 4.29: PDF Evento 14 (17 de marzo 2015).

4.15. Evento 15 (23 de junio 2015)

El evento de día 23 de junio de 2015 (Figura 4.30) fue el segundo evento más intenso del ciclo solar número 24, alcanzó valores de -204 nT durante las 5:00hrs UTC. Lo cual provocó un impacto positivo y posteriormente negativo en la ionosfera, antes de la fase máxima el TEC alcanzó 55.59 TECU durante el día, durante el evento 30.86 TECU y posteriormente 34.05 TECU, lo cual, debido a ser una tormenta tan intensa provocó que la ionosfera no se recuperara y continuara teniendo impacto negativos aún después de haber pasado la tormenta.

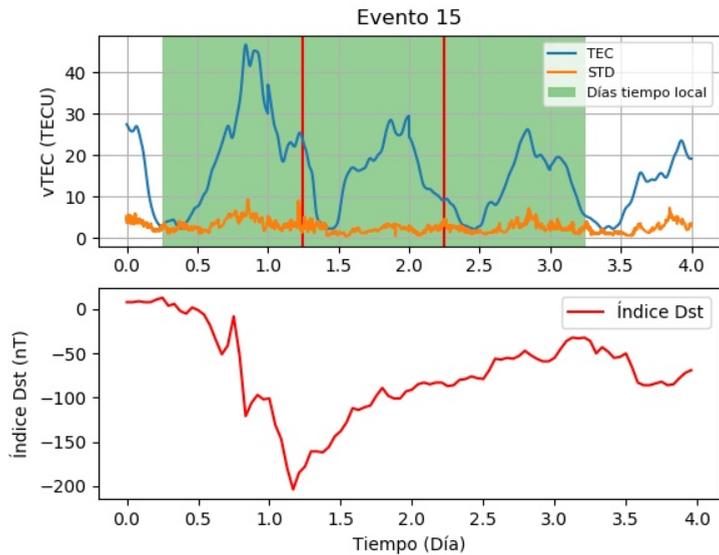


Figura 4.30: Evento 15 (23 de junio 2015).

La Figura 4.31 nos muestra los resultados del PDF para del evento del 23 de junio de 2015. Es posible apreciar el impacto negativo que se tiene en la ionosfera y los rangos que toman los días antes (42.56 a 55.59 TECU) durante (25.46 a 30.86 TECU) y después de la tormenta (24.06 a 34.05 TECU), destacando la forma en particular el día durante la tormenta, que muestra la poca variación del TEC en la zona.

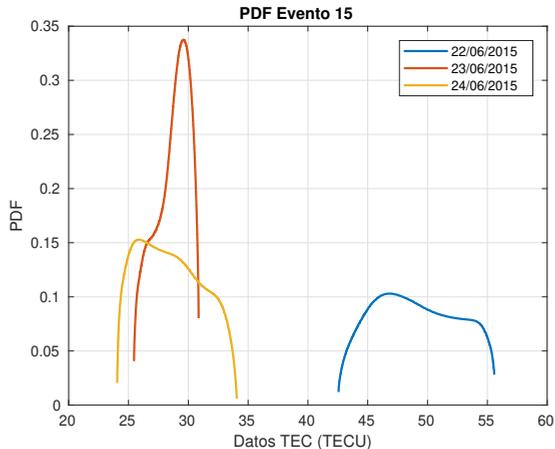


Figura 4.31: PDF Evento 15 (23 de junio 2015).

4.16. Evento 16 (7 de octubre 2015)

El 7 de octubre de 2015 se registró una tormenta geomagnética intensa (-124 nT), alcanzó su mayor intensidad a las 23:00hrs UTC. Provocó un impacto positivo en la ionosfera, sin embargo, se recuperó para el día siguiente tomando valores aproximados a los del día anterior de la tormenta. Antes de la tormenta el valor máximo del TEC durante el día fue de 40.05 TECU, durante la tormenta 71.80 TECU y después de la tormenta 28.10 TECU.

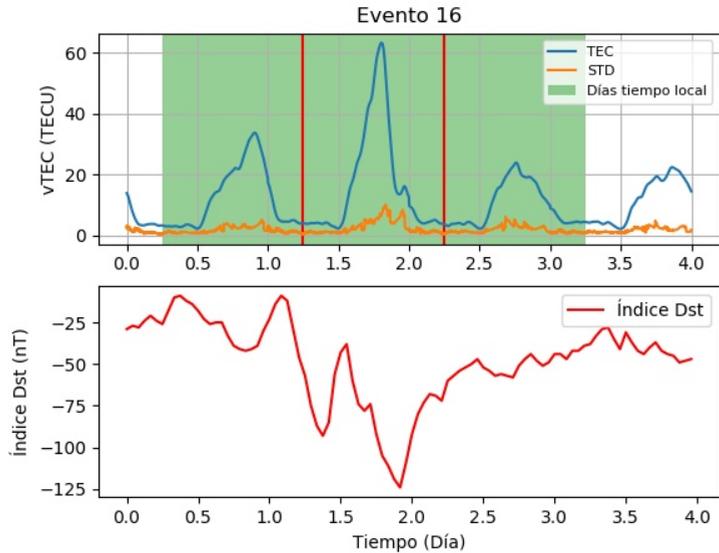


Figura 4.32: Evento 16 (7 de octubre 2015).

La Figura 4.33 muestra los resultados del evento 16 (7 de octubre de 2015), es posible apreciar en la gráfica el impacto positivo que se tiene durante la tormenta, además, podemos apreciar la dispersión o diferencia de rangos del TEC en la zona durante el evento teniendo una diferencia de hasta 14.89 TECU, sin embargo, la dispersión durante otras horas del día fue mayor como se puede apreciar en la Figura 4.32. Antes del evento la región de estudio alcanzó valores de 31.78 a 40.05 TECU, durante la tormenta de 56.92 a 71.80 TECU y después del día del evento de 19.61 a 28.10 TECU.

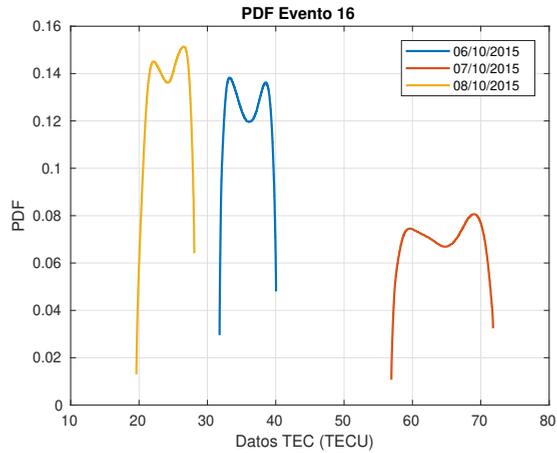


Figura 4.33: PDF Evento 16 (7 de octubre 2015).

4.17. Evento 17 (20 de diciembre 2015)

La tormenta del 20 de diciembre de 2015 (Figura 4.34) registró su mayor intensidad (-155 nT) a las 23:00hrs UTC. Provocó impacto positivo en la ionosfera, durante la tormenta el TEC aumento considerablemente ya que antes del evento el TEC alcanzó valores de 30.45 TECU y durante la tormenta 49.16 TECU lo cual nos indica que el día de la tormenta alcanzamos valores de 18.71 TECU más que el día anterior, y posteriormente después de la tormenta se registró 37.02 TECU esto nos indica que la ionosfera estaba recuperando sus valores de ciclo diurno correspondientes al ciclo estacionario.

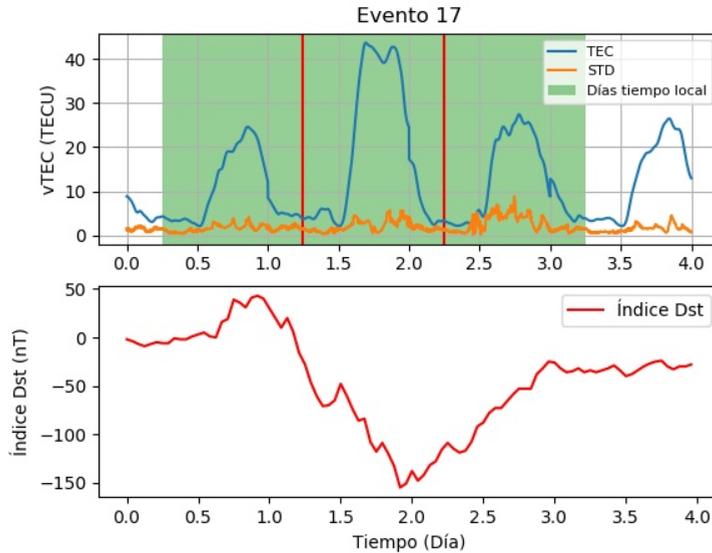


Figura 4.34: Evento 17 (20 de diciembre 2015).

La Figura 4.35 nos muestra los resultados del PDF para el evento del 20 de diciembre de 2015 en los cuales es posible apreciar el impacto positivo que se tiene en la ionosfera, antes de la tormenta el TEC en la zona tenía valores de 24.02 a 30.45 TECU, durante el evento se alcanzaron valores de 40.87 a 49.16 TECU y después de la tormenta de 23.72 a 37.02 TECU, teniendo mayor dispersión del TEC después de haber ocurrido la tormenta, cabe mencionar que el día después de la tormenta el campo magnético aún no se recuperaba por completo lo cual podría llegarse a pensar que esto provocó dicha dispersión del TEC durante el día.

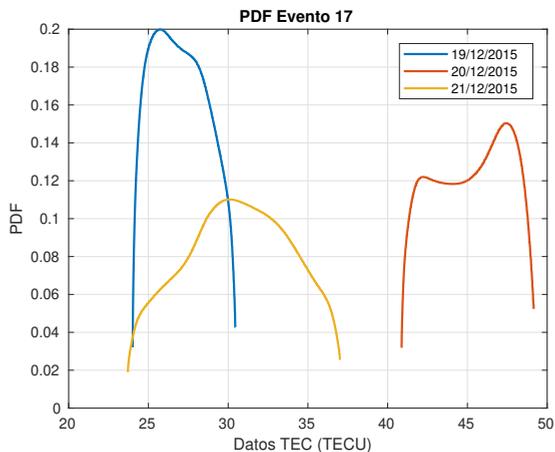


Figura 4.35: PDF Evento 17 (20 de diciembre 2015).

4.18. Evento 18 (1 de enero 2016)

La tormenta del 1 de enero de 2016 alcanzó valores -110 nT en su mayor intensidad a las 1:00hrs UTC. Durante su mayor intensidad provocó un aumento en el TEC con dos crestas en la gráfica del TEC durante ese día (Figura 4.36) sin embargo, los días posteriores presentaron una disminución en el TEC correspondiente al ciclo diurno, cuando inicio la tormenta el TEC alcanzó valores de 31.40 TECU, durante la tormenta 28.50 TECU y después 22.58 TECU, para este caso es necesario mayor cantidad de días para determinar con mayor precisión el impacto que se tuvo en la ionosfera (negativo o positivo), esto debido a la hora que se alcanzó la mayor intensidad.

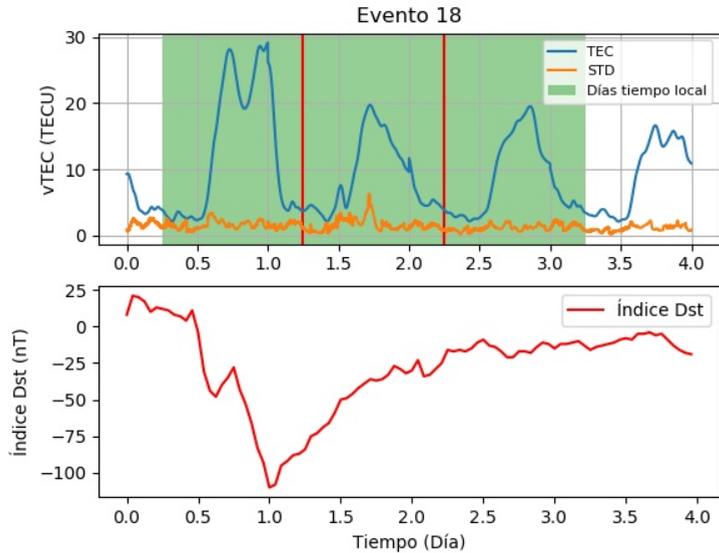


Figura 4.36: Evento 18 (1 de enero 2016).

Los resultados del PDF para el evento del 1 de enero de 2016 se muestran en la Figura 4.37 en los cuales es posible observar un impacto negativo durante el evento, sin embargo, analizando la Figura 4.36 es posible determinar que no está claro si tuvo impacto positivos o negativos en la ionosfera, durante la tormenta el TEC variaba de 18.45 a 28.50 TECU, una diferencia en la zona de 10.06 TECU, mientras que, antes de la tormenta hubo una diferencia de 4.94 TECU (26.46 a 31.40 TECU) y después de la tormenta el 3.17 TECU (19.41 a 22.58 TECU).

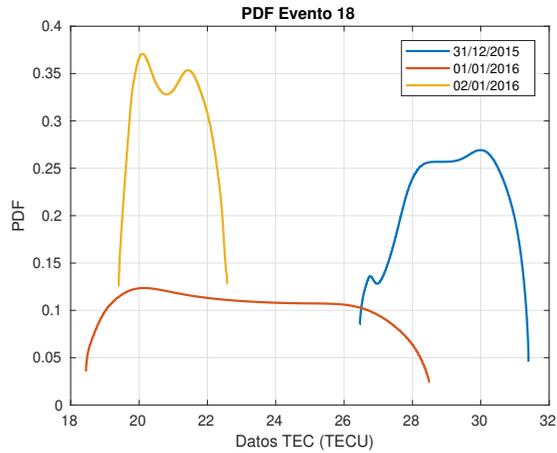


Figura 4.37: PDF Evento 18 (1 de enero 2016).

4.19. Evento 19 (13 de octubre 2016)

La Figura 4.38 muestra el índice Dst durante la tormenta geomagnética del 13 de octubre de 2016 y el TEC correspondiente a esta tormenta, la tormenta alcanzó su mayor intensidad a las 24:00 (-104 nT), es posible apreciar el impacto positivo que se tiene en la ionosfera durante la tormenta, antes de la tormenta el TEC incrementó hasta 23.12 TECU, durante la tormenta el valor subió hasta 55.99 TECU, 32.87 TECU más que el día anterior, después de la tormenta la ionosfera se recuperó a sus valores diurnos aproximados durante esa época del año, alcanzando valores de 34.79 TECU.

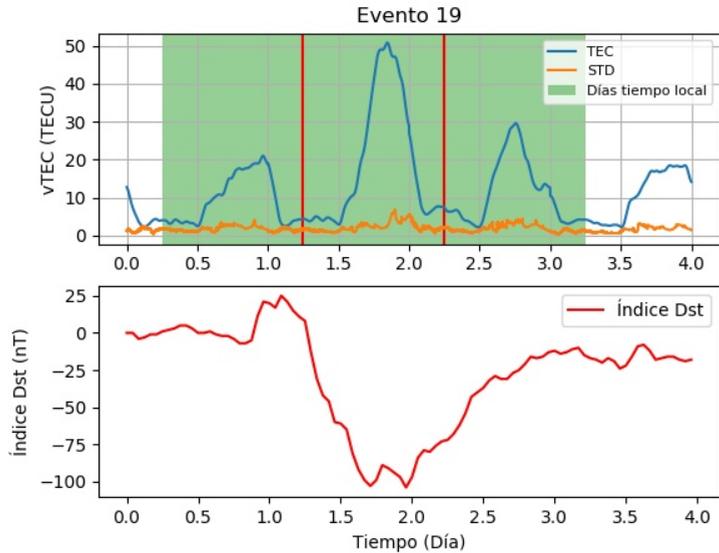


Figura 4.38: Evento 19 (13 de octubre 2016).

Durante el evento del 13 de octubre de 2016 los resultados del PDF (Figura 4.39) muestran el impacto positivo que se tiene en la ionosfera durante el evento, antes del evento los valores en la zona tenían una variación de 18.39 a 23.12 TECU, durante el evento de 49.57 a 55.99 TECU y después del evento de 26.31 a 34.79 TECU. A pesar del aumento del TEC durante el evento, los rangos mantuvieron una variación similar a los días antes y después de la tormenta.

el día que los valores del TEC tenían mayor variación ya que el más disperso tiene una diferencia en los rangos de 8.48 TECU.

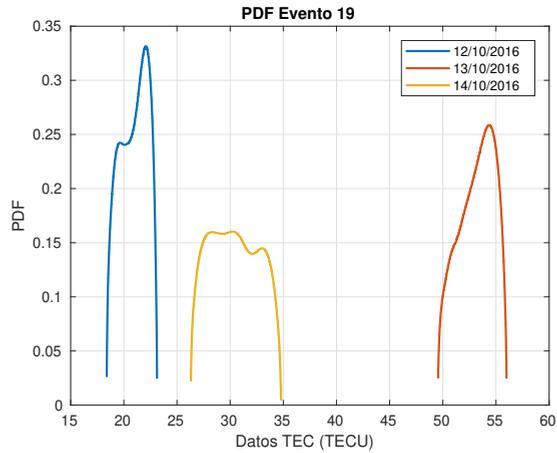


Figura 4.39: PDF Evento 19 (13 de octubre 2016).

4.20. Evento 20 (28 de mayo 2017)

El 28 de mayo de 2017 se registró una tormenta geomagnética que alcanzó su mayor intensidad (-125 nT) a las 8:00hrs UTC, dicha tormenta generó perturbaciones positivas cuando estaba en su mayor intensidad, de tal manera que, el TEC fue mayor en la noche que en el día, antes de la tormenta el TEC alcanzó valores de 36.33 TECU pero dicho valor ya tenía afectaciones por el inicio de la tormenta, durante la tormenta el TEC incrementó hasta 19.88 TECU y después de la tormenta hasta 20.43 TECU.

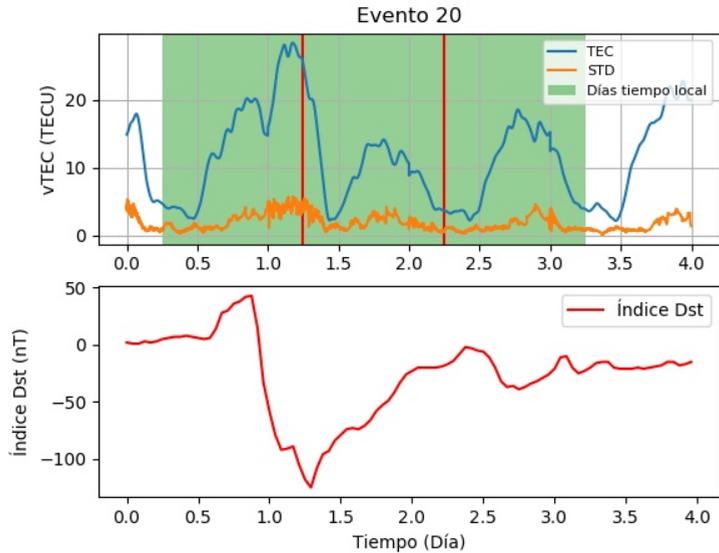


Figura 4.40: Evento 20 (28 de mayo 2017).

En la Figura 4.41 se muestran los resultados del PDF en los cuales es posible apreciar que la tormenta generó impacto negativo en la ionosfera, sin embargo analizando la Figura 4.40 es posible apreciar que cuando la tormenta se encontraba en aumento el TEC durante la noche aumentó considerablemente. Antes de la tormenta los valores del TEC en la zona variaban de 25.58 a 36.33 TECU, durante la tormenta 11.98 a 19.88 TECU y después 15.07 a 20.43 TECU.

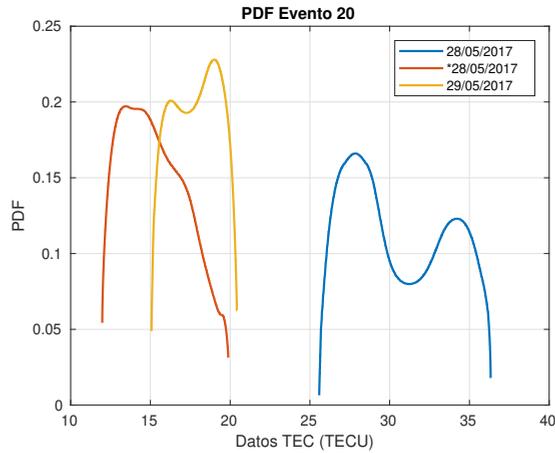


Figura 4.41: PDF Evento 20 (28 de mayo 2017).

4.21. Evento 21 (8 de septiembre 2017)

El índice Dst durante la tormenta del 8 de septiembre de 2017 (Figura 4.42) tiene un comportamiento particular ya que cuando la tormenta se encuentra en su mayor intensidad (-124 nT) y desciende a menor intensidad hay un momento en que la tormenta de nuevo se intensifica lo suficiente como para considerarla intensa en este momento, este comportamiento es asociado a dos eventos solares, el campo geomagnético estaba en recuperación del primer evento cuando impacto el segundo, por ello el índice Dst mostró este comportamiento. Durante la tormenta el TEC disminuyó relativamente a los valores del ciclo diurno que tomaba durante esta época del año, antes de la tormenta el TEC alcanzó valores de 30.21 TECU, durante la tormenta 21.13 TECU y después de la tormenta 23.61 TECU.

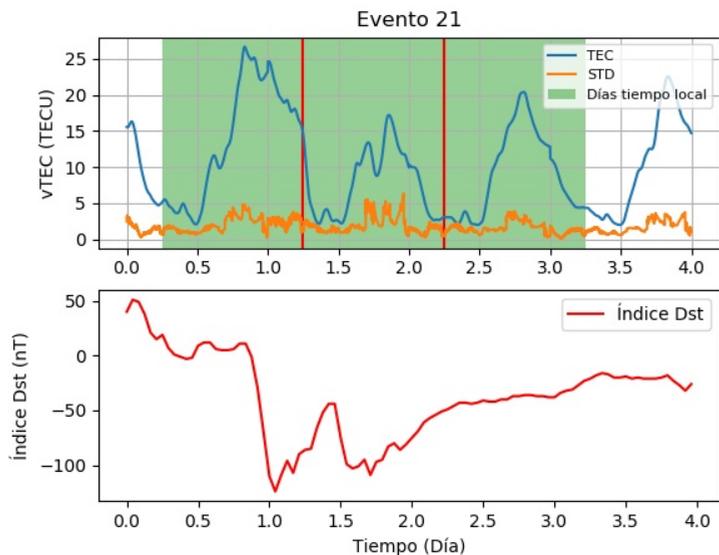


Figura 4.42: Evento 21 (8 de septiembre 2017).

Los resultados del PDF para la tormenta del 8 de septiembre de 2017 (Figura 4.43) nos muestran como disminuyeron los rangos del TEC en la zona durante y después de la tormenta, esto considerando que antes de la tormenta el TEC alcanzó valores de 21.32 a 30.21 TECU, durante la tormenta 12.74 a 21.13 TECU y después de la tormenta 17.56 a 23.61 TECU.

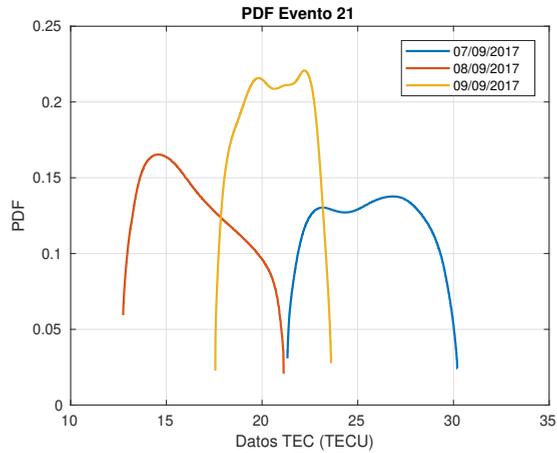


Figura 4.43: PDF Evento 21 (8 de septiembre 2017).

4.22. Evento 22 (26 de agosto 2018)

La tormenta del 26 de agosto de 2018 (Figura 4.44) fue la última registrada durante el ciclo solar número 24 y la tercera más intensa de este ciclo, a pesar de que el ciclo ya estaba finalizando cuando sucedió. Dicha tormenta alcanzó valores del índice Dst de -174 nT durante su mayor intensidad a las 7:00hrs y 8:00hrs UTC. Antes de la tormenta el TEC alcanzó valores de 31.69 TECU, durante la tormenta 11.09 TECU y después de la tormenta 20.39 TECU.

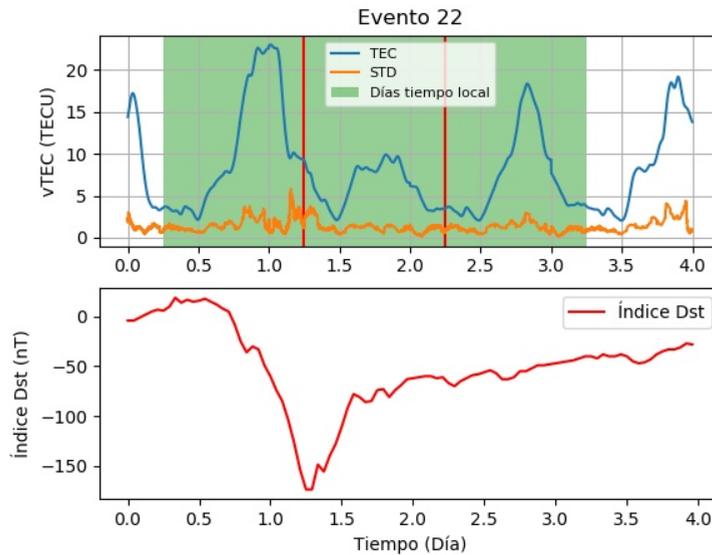


Figura 4.44: Evento 22 (26 de agosto 2018).

En la Figura 4.45 muestran los resultados del PDF para el evento del 26 de agosto de 2018 en los cuales es posible apreciar el impacto negativo que se registró durante este evento, antes de la tormenta el TEC alcanzó valores de 22.43 a 31.69 TECU, durante el evento 8.60 a 11.09 TECU y después de 15.12 a 20.39 TECU. Por lo cual se aprecia la uniformidad de los valores durante la tormenta, ya que los valores en la región variaron 2.48 TECU en este día.

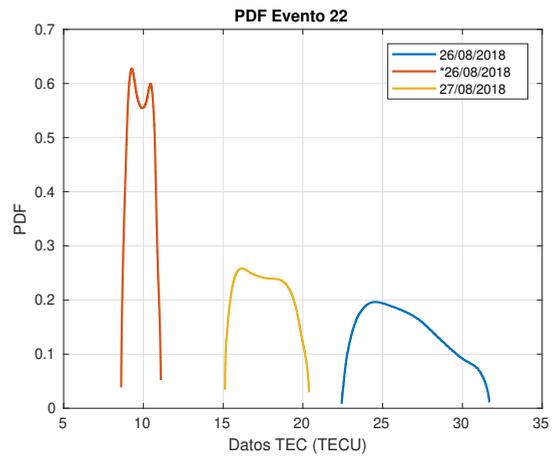


Figura 4.45: PDF Evento 22 (26 de agosto 2018).

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Las manchas solares aumentan la probabilidad de tormentas geomagnéticas, sin embargo, a partir de este estudio se pudo concluir que no existe relación entre la intensidad de la tormenta geomagnética con la cantidad de manchas solares, la muestra más notable de ello es el evento 22, que forma parte de los eventos más intensos del ciclo y sucedió cuando el ciclo solar era mínimo.

Durante las perturbaciones en el campo magnético se tienen tormentas ionosféricas, las cuales pueden ser positivas *y/o* negativas, en los eventos analizados existen casos que durante la noche se presentan alteraciones en la ionosfera, lo cual podría indicar una perturbación positiva, sin embargo, durante el día presentan perturbaciones negativas como es el caso de los eventos 4 (9 de marzo del 2012), 5 (24 de abril del 2012), 7 (1 de octubre del 2012), 8 (9 de octubre del 2012), 12 (29 de junio 2013), 15 (23 de junio del 2015) y 20 (28 de mayo de 2017). Todos estos eventos que comparten esta característica sucedieron durante la noche y tuvieron un impacto negativo, esto nos indica que, si una tormenta geomagnética suficientemente intensa ($Dst \leq -100nT$) alcanza su mayor intensidad durante la noche y altera la ionosfera en la noche, posteriormente provocara perturbaciones negativas en la ionosfera durante el día.

Los eventos 14 (17 de marzo de 2015) y 15 (23 de junio 2015) alcanzaron un índice Dst de -222 nT y -204 nT respectivamente, fueron los mas intensos del ciclo solar 24 y los únicos con descensos menores a -200nT, pero, a pesar de la gran intensidad de ambos, uno provocó aumento en el TEC durante la noche, y el otro impacto negativo durante el día. Por lo que concluimos que, la intensidad de la tormenta geomagnética no define el tipo de perturbación que provocará en la ionosfera, sin embargo, quien si tiene un papel importante en esto es el ciclo diurno.

El evento 10 (17 de marzo de 2013) fue el que tuvo mayor TEC en la ionosfera durante el ciclo 24, provocando alteraciones de 80.93 TECU, pero, este evento está asociado a una tormenta con intensidad de -132 nT por lo tanto es la mas cercana al promedio de intensidad. Por otra parte, el evento más intenso respecto al campo geomagnético fue el evento 14 (17 de marzo de 2015), alcanzando su mayor intensidad de -222 nT, este evento aumento hasta 60.69 TECU en la zona, pero, a pesar de ser un valor alto, hubo casos con mayor TEC bajo las mismas épocas del año y con menor intensidad del campo geomagnético. Ambos eventos sucedieron durante el invierno, en el día y con perturbaciones negativas, pero, a pesar de compartir estas características tienen una gran diferencia en el índice Dst. Por lo cual concluimos que, los eventos, a pesar de compartir características similares, la intensidad de la tormenta geomagnética no esta asociada directamente a que tanto aumentará el TEC durante la tormenta.

Los eventos que alcanzan su mayor intensidad durante el día tienen tendencias a tormentas positivas, esto sucede debido a la incidencia directa del evento solar en la zona de estudio.

Las tormentas 4 (9 de marzo del 2012), 10 (17 de marzo del 2013), 13 (1 de junio del 2013), 14 (17 de marzo del 2015) y 18 (1 de enero de 2016) se presentaron durante los inviernos y la mayoría de estas presentaron impacto positivo en la ionosfera, a pesar de no tener relaciones o patrones respecto a la intensidad del índice Dst, el impacto positivo marcó una diferencia considerable durante esta parte del ciclo estacionario. Por lo cual, es evidente que durante el invierno es mas probable

que se presenten tormentas ionosféricas positivas que negativas (4 de 5 fueron positivas durante todo el ciclo 24).

Las tormentas 5 (24 de abril del 2012), 11 (1 de junio del 2013) y 20 (28 de mayo del 2017) sucedieron durante la primavera y tienen la particularidad de que las 3 son tormentas negativas durante el día, mientras que, las tormentas registradas en el otoño también tienen una marcada diferencia respecto al impacto en la ionosfera, el 80 % de las tormentas de otoño son positivas, por lo tanto, esto nos permite concluir que, el ciclo estacionario es un factor importante para el tipo de tormenta ionosférica que provocaran los eventos geomagnéticos.

Los resultados obtenidos a partir del PDF muestran información relevante referente a los eventos, el PDF a diferencia de los mapas nos muestran de que manera están distribuidos los datos estadísticamente, lo cual, nos permite tener una mejor visualización, de la cantidad de datos con diferentes valores del TEC, sin embargo, se complementa con los mapas para visualizar la ubicación geográfica de dichos datos. Tanto los mapas como el PDF, muestran elementos en común del evento, por lo que es posible utilizarlos de manera independiente, pero, si los complementamos tenemos información importante representada de diferente manera, además de las características únicas para cada uno de ellos.

Analizando los eventos seleccionados se corroboró las perturbaciones que pueden producir las tormentas geomagnéticas intensas. Los eventos tienen características similares del TEC en la zona, durante las diferentes estaciones del año, principalmente los rangos que ocupan los valores del TEC. A pesar que el PDF nos muestra características importantes para el análisis de los eventos, necesitan como complemento las gráficas del TEC para un mejor análisis de los eventos.

El clima espacial es un fenómeno complicado ya que hay eventos que bajo condiciones muy similares tienen impacto diferentes en nuestro campo geomagnético, sin embargo, es de vital importancia estudiarlo debido a los riesgos que puede llegar a significar para la humanidad. La implementación del GPS en el estudio del clima espacial fue un gran

avance para esta ciencia, es importante considerar el desarrollo de software más eficientes y con intervalos de muestreo más pequeños, como un paso a seguir para nuevas investigaciones del clima espacial, esto nos permitirá analizar los eventos con mayor detalle. Como trabajo futuro de esta investigación, es importante considerar ventanas de tiempo mayores, que se ajusten mejor a cada uno de los eventos, ya que hay eventos que no cuentan con días quietos antes de la fase máxima de la tormenta.

Bibliografía

- Abramowitz, M. y Stegun, I. A. (1965). *Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables*, volume 55. Courier Corporation.
- Adams, W. G. (1892). Iv. comparison of simultaneous magnetic disturbances at several observatories. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.(A.)*, (183):131–139.
- Alizadeh, M. M., Sobhkhiz, S., y Zare, S. (2018). Ionospheric changes caused by solar eclipse august 21st 2017, as obtained by gps observations. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 20, page 4995.
- Anderson, D. y Fuller-Rowell, T. (1999). *The ionosphere*. Space Environment Center.
- Araujo-Pradere, 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.
- Arora, B., Morgan, J., Ord, S., Tingay, S., Bell, M., Callingham, J., Dwarkanath, K., Hancock, P., Hindson, L., Hurley-Walker, N., et al. (2016). Ionospheric modelling using gps to calibrate the mwa. ii: Regional ionospheric modelling using gps and glonass to estimate ionospheric gradients. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33.
- Atıcı, R. (2018). Comparison of gps tec with modelled values from iri 2016 and iri-plas over istanbul, turkey. *Astrophysics and Space Science*, 363(11):231.
- 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 3–1–SMP 3–7.

- Bilitza, D., McKinnell, L.-A., Reinisch, B., y Fuller-Rowell, T. (2011). The international reference ionosphere today and in the future. *Journal of Geodesy*, 85(12):909–920.
- Bounhir, A., Benkhaldoun, Z., FLEURY, R., Amory-Mazaudier, C., Kaab, M., et al. (2017). Variability of the vertical total electron content, from gps data, during 2 to 8 november 2015, using oukaïmeden and rabat stations in morocco. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 13(S335):159–161.
- Bouza, M. (2017). *Estudio de perturbaciones ionosféricas a través de Contenido Total de Electrones en Europa meridional*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Broun, J. A. (1861). Xxiii.—on the horizontal force of the earth’s magnetism. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 22(3):511–565.
- 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.
- Chapman, S. (1931). The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. *Proceedings of the Physical Society*, 43(1):26–45.
- Cipagauta, C. (2007). *Dinámica de la ionosfera de latitudes bajas*. PhD thesis, Tesis de Magister en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México
- Crowley, G. y Azeem, I. (2018). Chapter 23 - extreme ionospheric storms and their effects on gps systems. In Buzulukova, N., editor, *Extreme Events in Geospace*, pages 555 – 586. Elsevier.
- Davies, K. (1990). *Ionospheric radio*. Number 31. IET.
- 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).

- Erickson, W., Perley, R., Flatters, C., y Kassim, N. (2001). Ionospheric corrections for vla observations using local gps data. *Astronomy & Astrophysics*, 366(3):1071–1080.
- GEDI (2019). Geomagnetic equatorial dst index — gedi. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>. (Acceso el 10/10/2019).
- Gleason, S., Gebre-Egziabher, D., y Egziabher, D. G. (2009). Gnss applications and methods.
- Gombosi, T. I. (1998). *Physics of the space environment*. Cambridge University Press.
- 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.
- Grechnev, V. V., Kiselev, V. I., Uralov, A. M., Meshalkina, N. S., y Kochanov, A. A. (2013). An Updated View of Solar Eruptive Flares and the Development of Shocks and CMEs: History of the 2006 December 13 GLE-Productive Extreme Event*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65(sp1). S9.
- Hargreaves, J. K. (1992). The solar-terrestrial environment, cambridge atmospheric and space science series. *Cambridge University Press*, 1:992.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2007). *GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Hong, L. (2008). Interpolation and mapping of the total electron content over the malaysian region. *Master of science Thesis University of Technology, Malaysia, Universiti Teknologi Malaysia Institutional Repository*.
- Jakobsen, J., Knudsen, P., y Jensen, A. B. (2010). Analysis of local ionospheric time varying characteristics with singular value decomposition. *Journal of Geodesy*, 84(7):449–456.
- Jin, S., Cardellach, E., y Xie, F. (2014). *Introduction to GNSS*, pages 3–16. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Klobuchar, J. A. (1997). Real-time ionospheric science: The new reality. *Radio Science*, 32(5):1943–1952.

- Kundu, S., Chakrabarti, S. K., Sasmal, S., y Chakraborty, S. (2018). Ionospheric gps total electron content response over indian region to the solar flares of the year 2017. In *42nd COSPAR Scientific Assembly*, volume 42.
- Lin, J. y Zhu, F. (2018). Evaluation of leo based gps slant tec using a simulation technique. *Astrophysics and Space Science*, 363(11):241.
- Liu, S., Yang, J., Yu, T., y Zhang, Z. (2018). Horizontal spatial correlation of the ionospheric tec derived from gps global ionospheric maps. *Advances in Space Research*, 62(7):1775–1786.
- López, R. (2010). Cálculo del contenido total de electrones (tec) en la ionosfera sobre diversas estaciones mexicanas de gps y su relación con el clima espacial asociado a ráfagas intensas de rayos x. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- López, R. (2015). *El clima espacial y su impacto sobre la ionosfera terrestre a latitudes medias*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Misra, P. y Enge, P. (2011). Global positioning system: Signals, measurements and performance revised.
- Méndez, B. V. H. (2017). Análisis de perturbaciones ionosféricas utilizando el código ustec, durante el ciclo solar 23. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Moos, N. A. F. (1910). *Magnetic observations made at the Government Observatory, Bombay, for the period 1846 to 1905 and their discussion*, volume 35.
- NASA (2019). La rotación solar varía según la latitud — nasa. https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/solar-rotation.html. (Acceso el 09/20/2020).
- Olmedillas, J. C. (2012). *Introducción a los sistemas de navegación por satélite*. Editorial UOC.
- Olwendo, O., Baki, P., Mito, C., y Doherty, P. (2012). Characterization of ionospheric gps total electron content (gps-tec) in low latitude zone over the kenyan region during a very low solar activity phase. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 84:52–61.
- Patel, N. C., Karia, S. P., y Pathak, K. N. (2018). Variation of gps-tec in a low latitude indian region during the year 2012 and 2013. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1953, page 140111. AIP Publishing.

- 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*.
- Radicella, M. (2000). Space wather: la meteorología ionosférica y sus efectos. *Física de la Tierra*, (12):189–204.
- Rasmussen, J., Kossey, P., y Lewis, E. (1980). Evidence of an ionospheric reflecting layer below the classical d region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85(A6):3037–3044.
- Razin, M. R. G., Voosoghi, B., y Mohammadzadeh, A. (2016). Efficiency of artificial neural networks in map of total electron content over iran. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51(3):541–555.
- Ribeiro, B. A., Fagundes, P. R., Pillat, V. G., Vieira, F., Venkatesh, K., Dias, M., y Tardelli, A. (2018). Ionospheric space weather response due to the geomagnetic storm of may 2017, in the brazilian sector. In *42nd COSPAR Scientific Assembly*, volume 42.
- 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.
- Schunk, R. y Nagy, A. (2009). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge university press.
- Shreedevi, P., Choudhary, R., Yadav, S., Thampi, S., y Ajesh, A. (2018). Variation of the tec at a dip equatorial station, trivandrum and a mid latitude station, hanle during the descending phase of the solar cycle 24 (2014–2016). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179:425–434.
- 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.
- Thirupathaiah, P., Shah, S. Y., y Haider, S. (2019). Characteristics of solar x-ray flares and their effects on the ionosphere and human exploration to mars: Mgs radio science observations. *Icarus*.

- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Lakhina, G. S., y Alex, S. (2003). The extreme magnetic storm of 1–2 september 1859. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A7).
- Wright, J. (1962). Dependence of the ionospheric f region on the solar cycle. *Nature*, 194(4827):461–462.
- Yasyukevich, Y., Astafyeva, E., Padokhin, A., Ivanova, V., Syrovatskii, S., y Podlesnyi, A. (2018). The 6 september 2017 x-class solar flares and their impacts on the ionosphere, gnss, and hf radio wave propagation. *Space Weather*, 16(8):1013–1027.
- 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*.

Anexos

Durante este capítulo de anexos agregamos los mapas ionosféricos realizados durante el estudio, los cuales se realizaron considerando las dimensiones de la zona de estudio mencionada anteriormente, para cada evento se realizaron tres mapas ionosféricos, uno por cada día analizado (antes, durante y después de la tormenta geomagnética). Los valores más importantes del TEC diario se encuentran en su mayor intensidad, por ello, cada uno de los mapas se realizaron con los valores máximos del TEC diario de la estación utilizada. La necesidad de generar mapas surge como complemento para saber la dispersión del TEC en la zona, a diferencia del PDF los mapas localizan en un plano geográfico los valores del TEC.

Evento 1

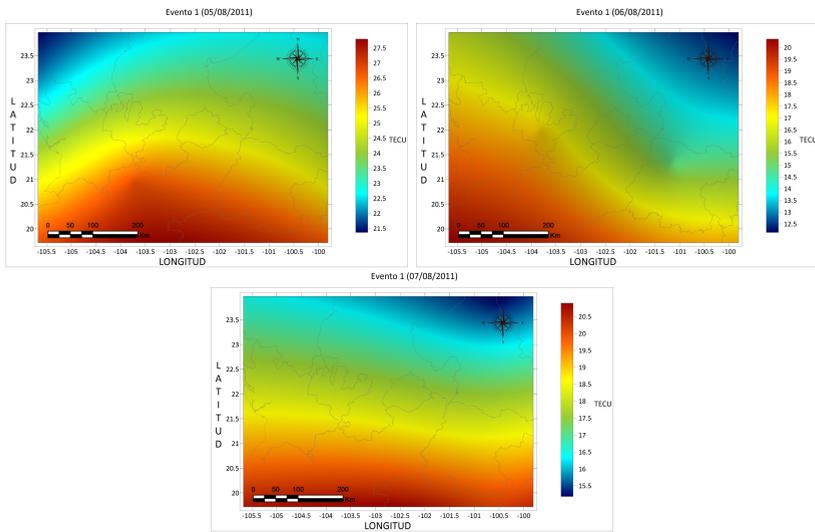


Figura 5.1: Mapas ionosféricos del Evento 1

Evento 2

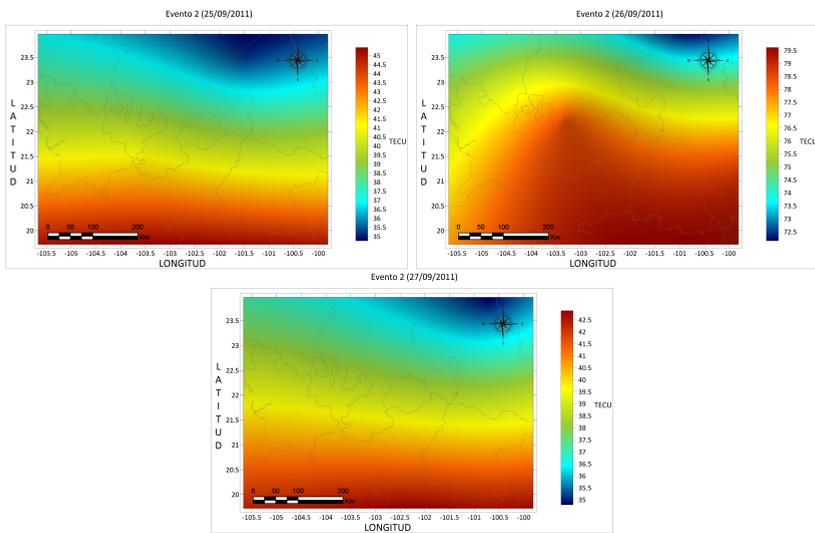


Figura 5.2: Mapas ionosféricos del Evento 2

Evento 3

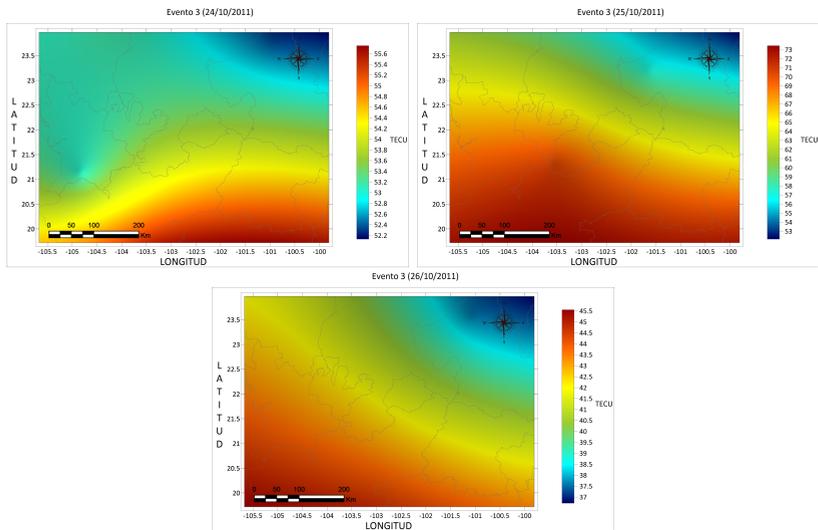


Figura 5.3: Mapas ionosféricos del Evento 3

Evento 4

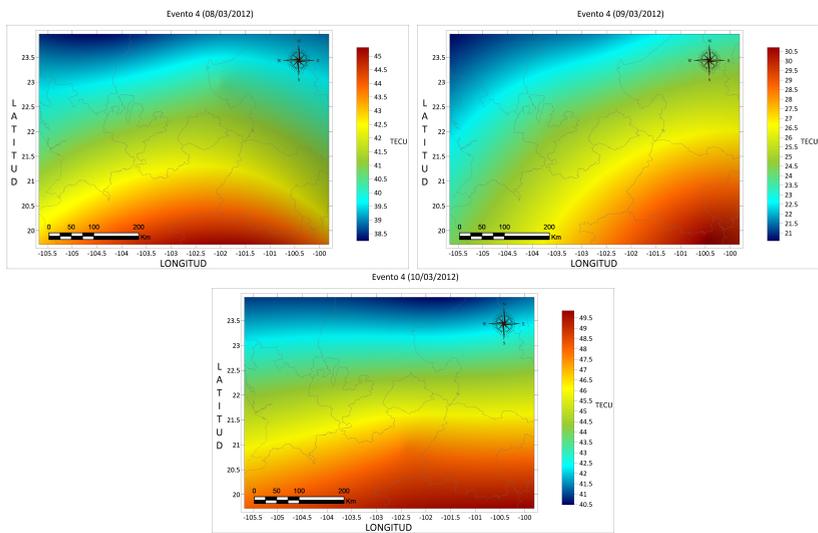


Figura 5.4: Mapas ionosféricos del Evento 4

Evento 5

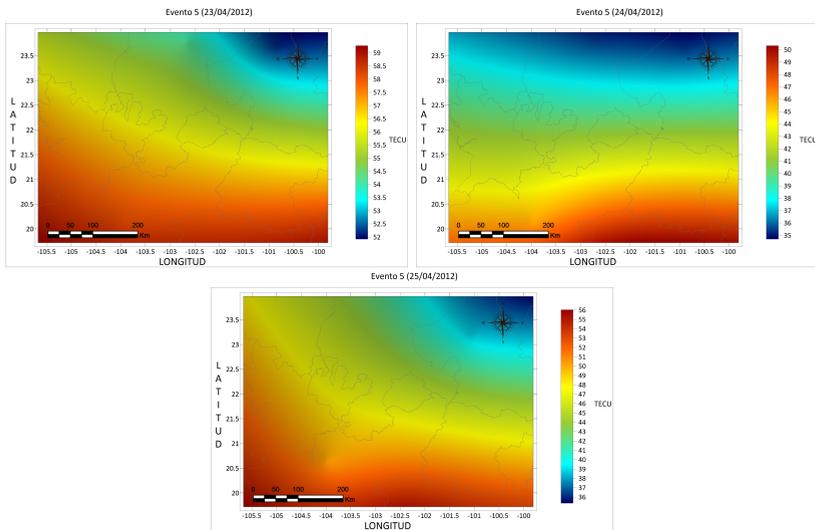


Figura 5.5: Mapas ionosféricos del Evento 5

Evento 6

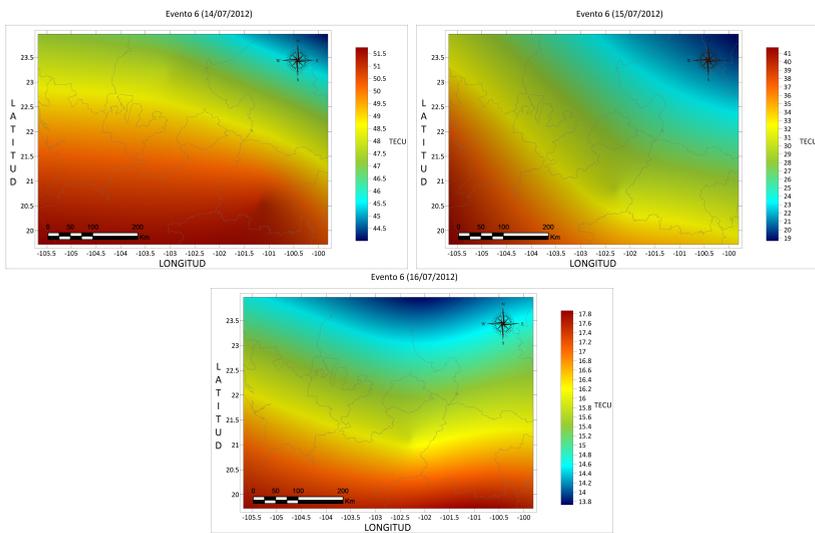


Figura 5.6: Mapas ionosféricos del Evento 6

Evento 7

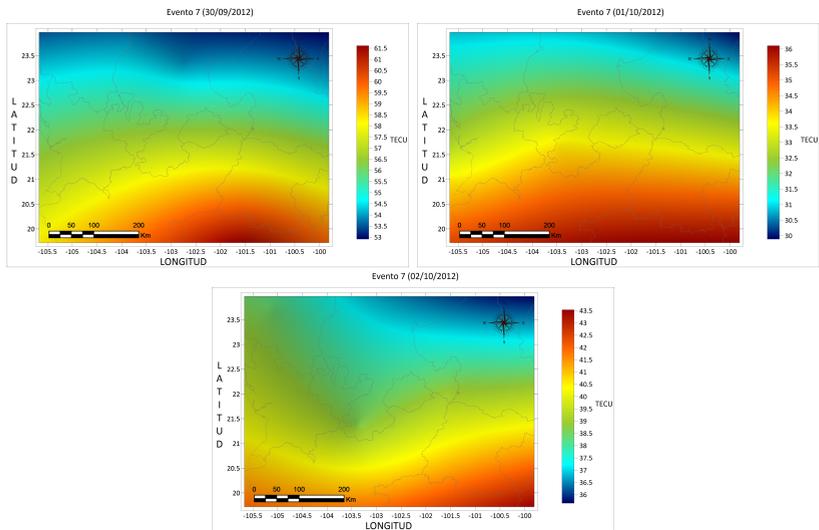


Figura 5.7: Mapas ionosféricos del Evento 7

Evento 8

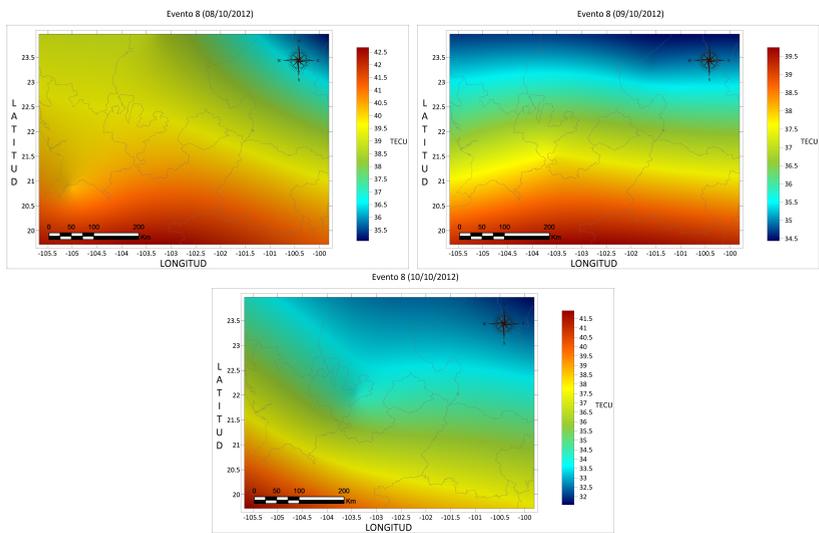


Figura 5.8: Mapas ionosféricos del Evento 8

Evento 9

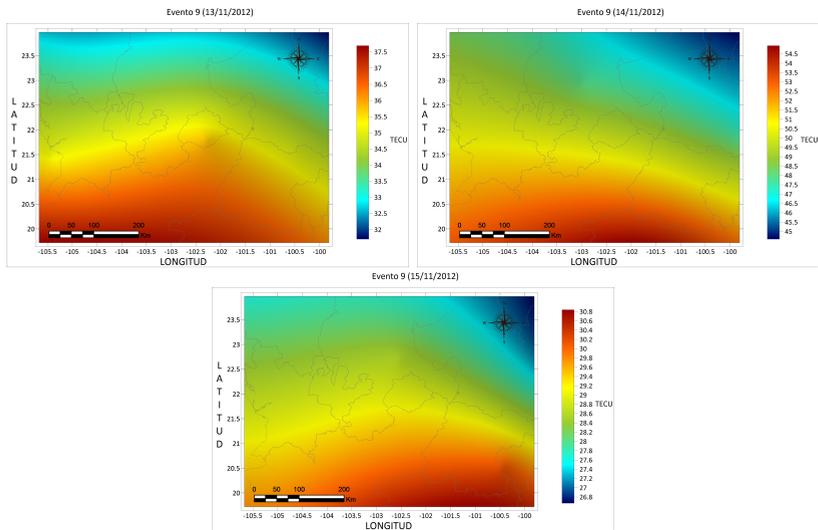


Figura 5.9: Mapas ionosféricos del Evento 9

Evento 10

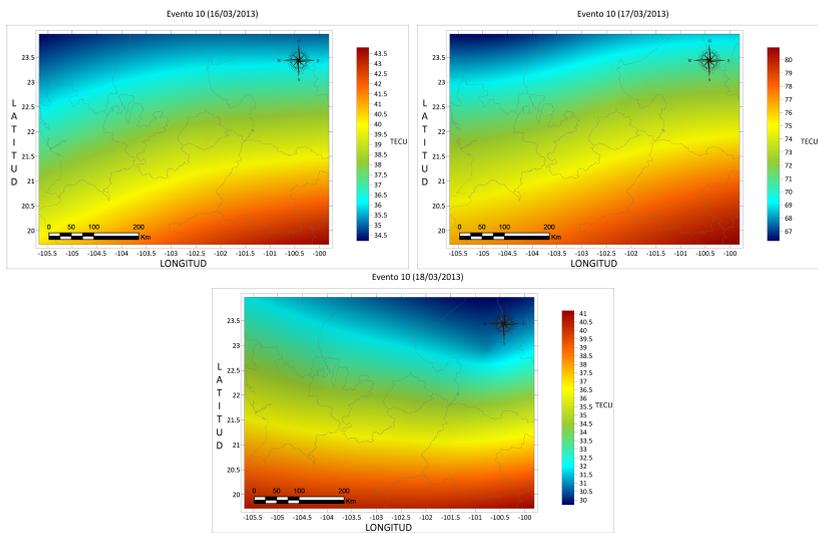


Figura 5.10: Mapas ionosféricos del Evento 10

Evento 11

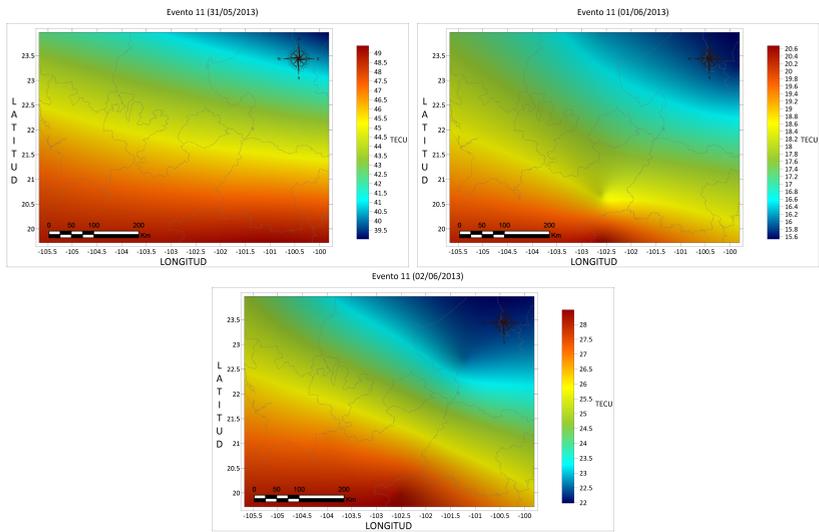


Figura 5.11: Mapas ionosféricos del Evento 11

Evento 12

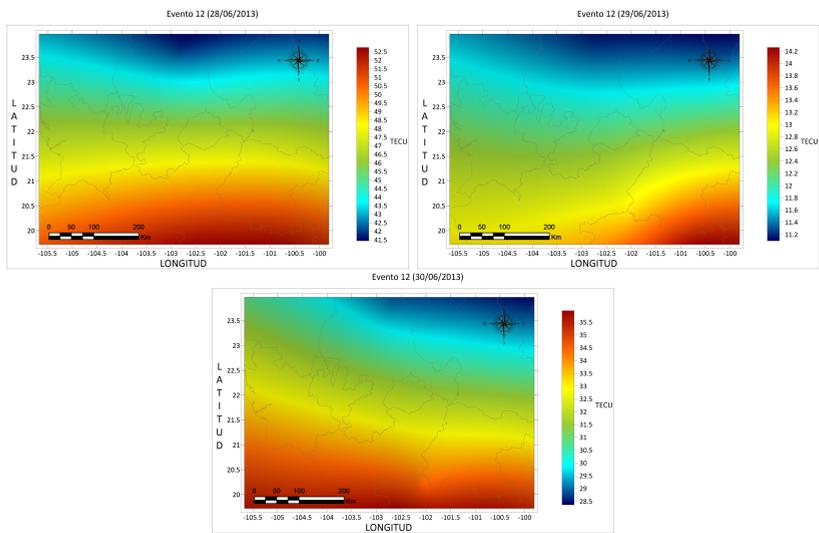


Figura 5.12: Mapas ionosféricos del Evento 12

Evento 13

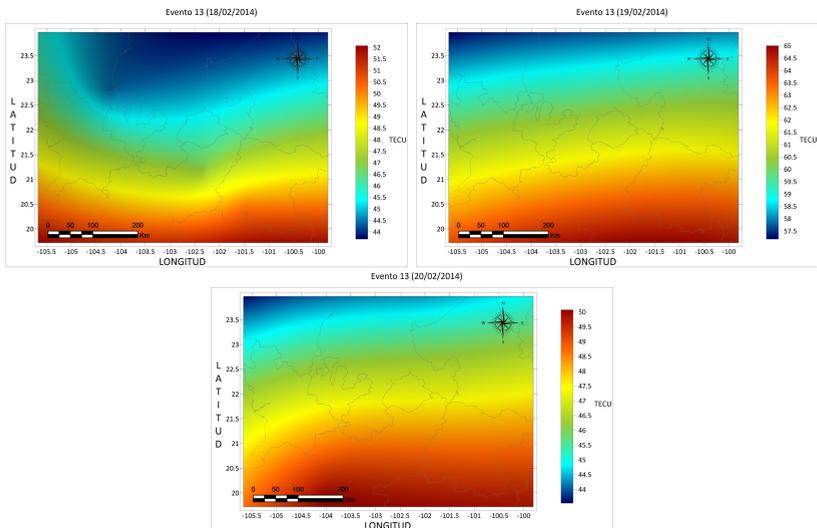


Figura 5.13: Mapas ionosféricos del Evento 13

Evento 14

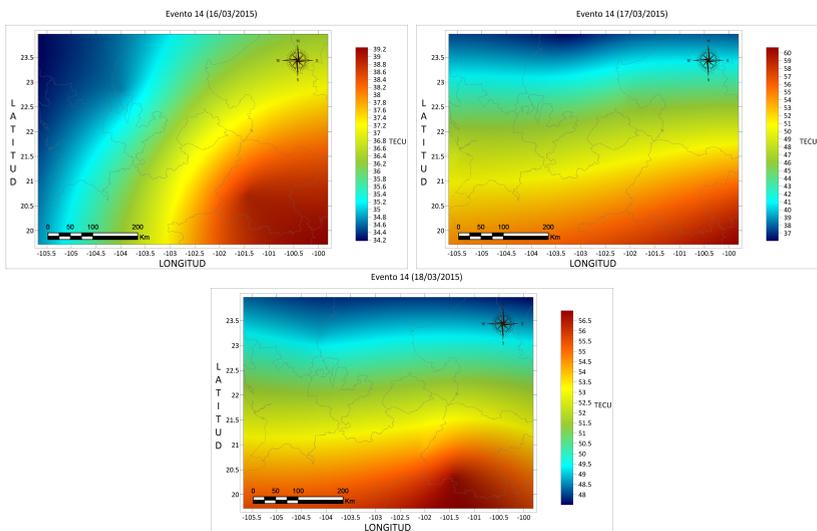


Figura 5.14: Mapas ionosféricos del Evento 14

Evento 15

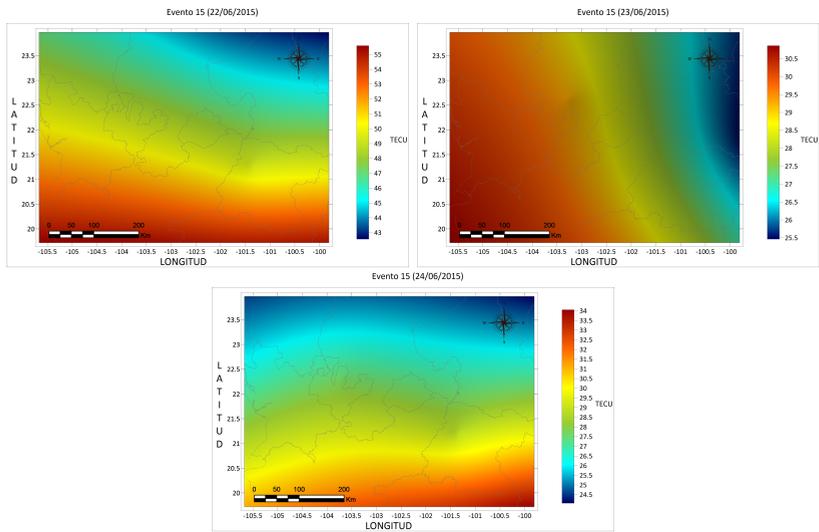


Figura 5.15: Mapas ionosféricos del Evento 15

Evento 16

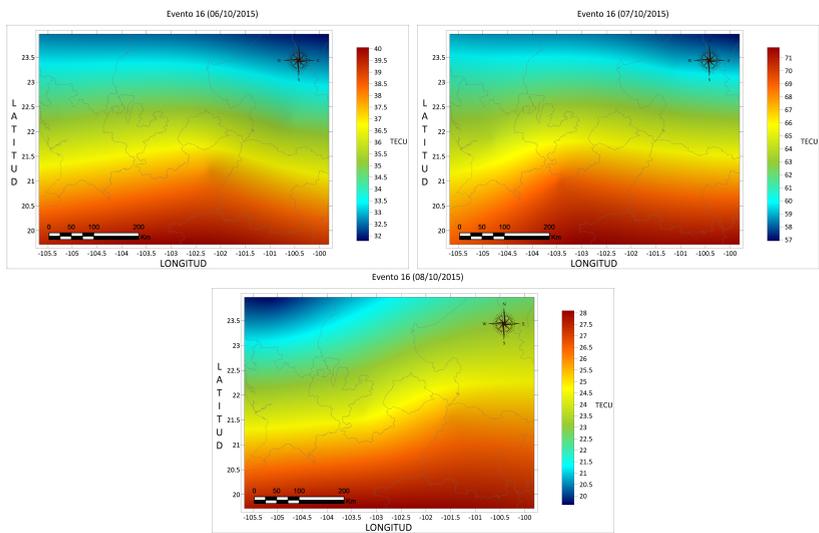


Figura 5.16: Mapas ionosféricos del Evento 16

Evento 17

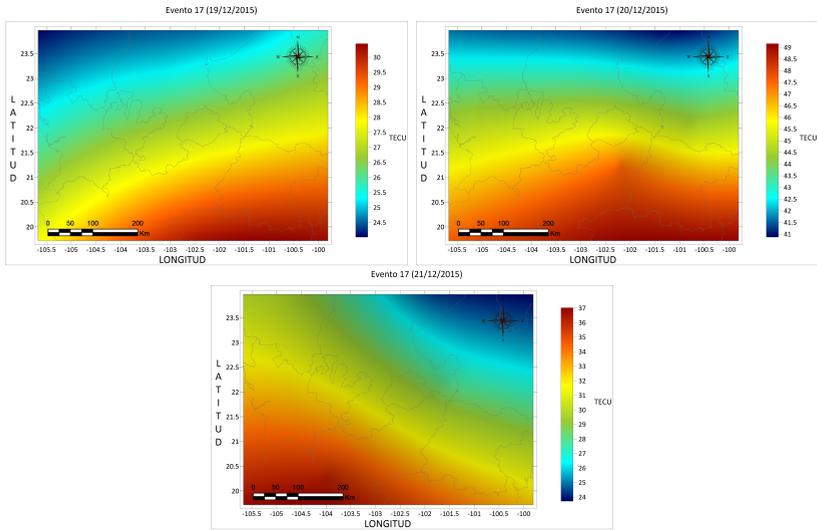


Figura 5.17: Mapas ionosféricos del Evento 17

Evento 18

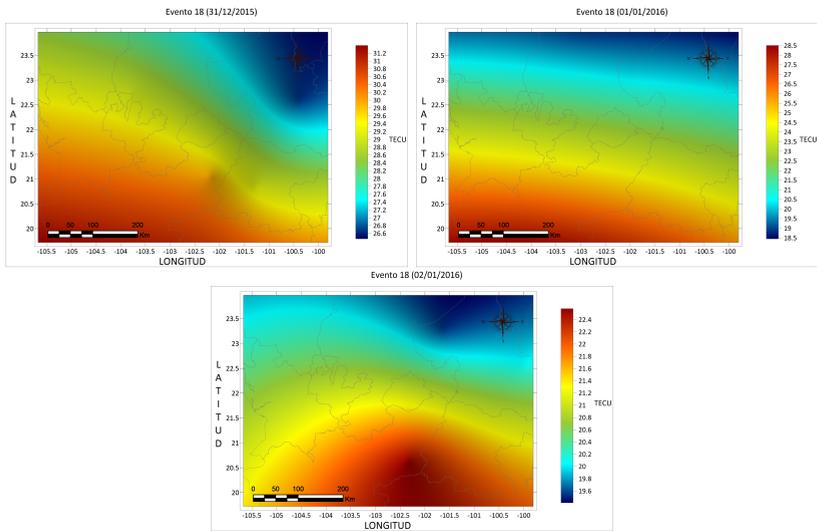


Figura 5.18: Mapas ionosféricos del Evento 18

Evento 19

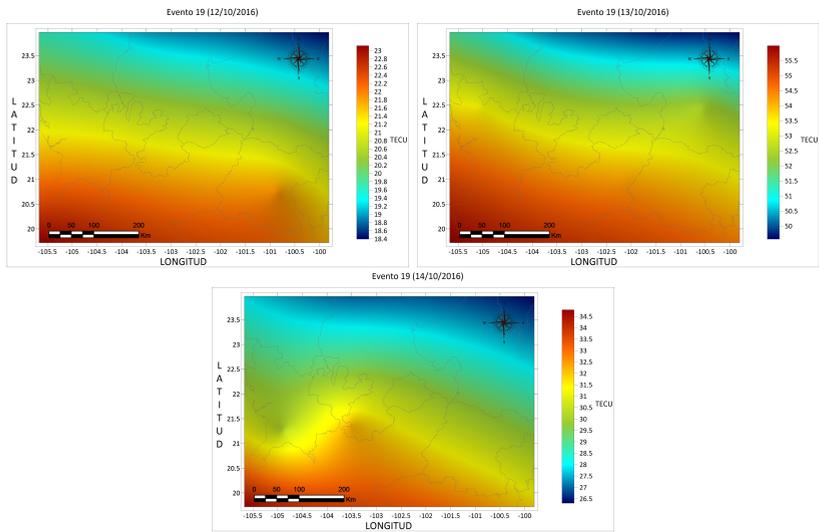


Figura 5.19: Mapas ionosféricos del Evento 19

Evento 20

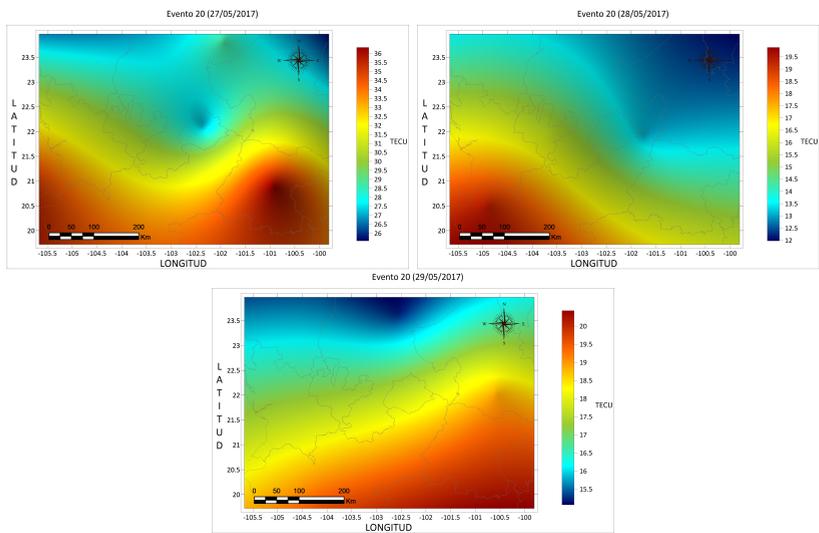


Figura 5.20: Mapas ionosféricos del Evento 20

Evento 21

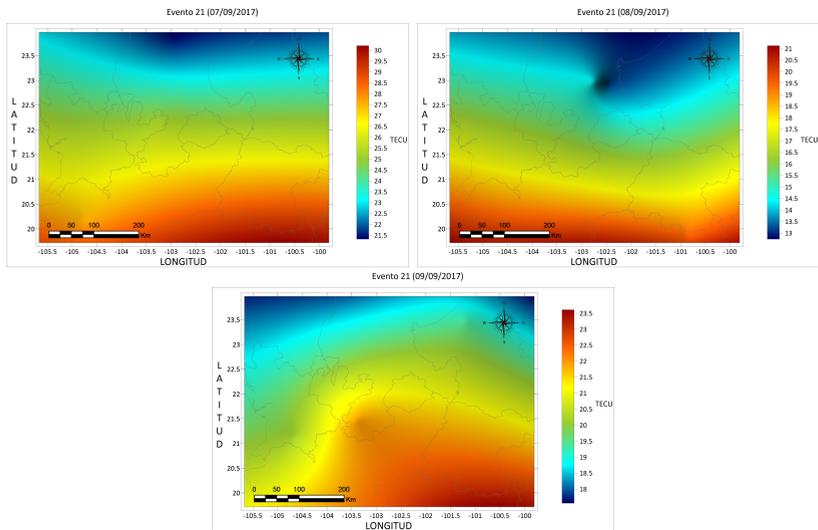


Figura 5.21: Mapas ionosféricos del Evento 21

Evento 22

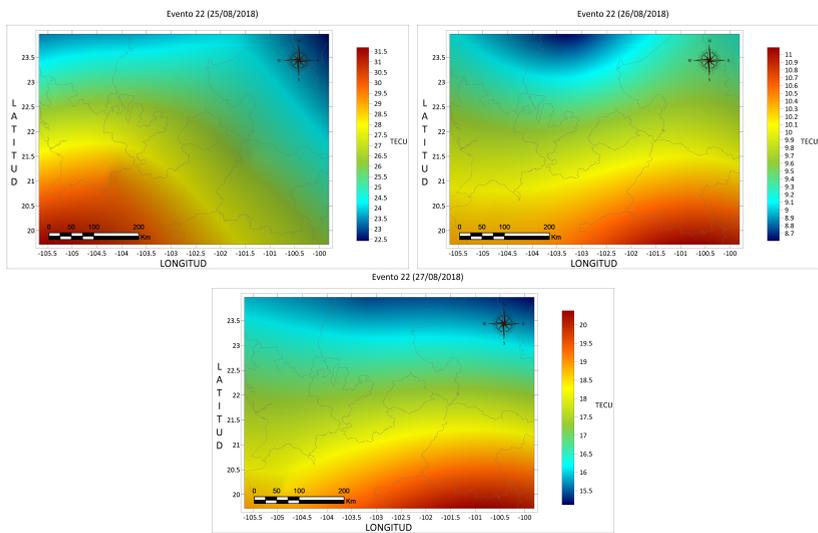


Figura 5.22: Mapas ionosféricos del Evento 22