



Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia
Ciencias Atmosféricas, Espaciales y Planetarias

**Estudio comparativo entre MAGIC y GIM ante la
respuesta del vTEC ionosférico debida a tormentas
geomagnéticas ocurridas durante el 2017**

T E S I S

que para optar por el grado de
Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Shaden Saray Hernández Anaya

Director de Tesis

Dr. Mario Rodríguez Martínez

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia

Comité Tutor

Dra. Maria Sergeeva

SCiESMEX, Instituto de Geofísica Unidad Morelia

Dr. Julio César Mejía Ambriz

SCiESMEX, Instituto de Geofísica Unidad Morelia

Morelia, Michoacán. Enero 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradecimiento Institucionales

Agradezco a la DGAPA-UNAM, en particular al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) que por medio del proyecto **IN118119**: *Estudio del comportamiento del vTEC ionosférico durante tormentas geomagnéticas intensas del ciclo solar 24*, me otorgó una beca para la obtención de grado.

Agradezco a CONACyT por la beca de maestría otorgada.

Agradezco a la NOAA por el uso del código MAGIC para el cálculo del vTEC.

Agradezco al Servicio Sismológico Nacional (SSN), por los datos RINEX prestados para el análisis ionosférico haciendo uso de los mismos.

Agradecimientos Académicos

Principalmente, quiero agradecer al Dr. Mario por todo el apoyo, no solo académico, también personal que me ha brindado a lo largo de este periodo como su estudiante. Por darme la oportunidad de tener acceso al Observatorio Solar y al Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales, así como dejarme participar en las charlas de divulgación del laboratorio.

Agradezco la participación y el apoyo en la revisión de mi trabajo por parte de cada uno de mis sinodales: Dr. Ernesto Aguilar, Dra. Maria Sergeeva, Dra. Esmeralda Romero y Dra. Diana Rojas.

Agradezco al Dr. Julio Mejía por ser parte del comité evaluador cada semestre, por las ideas y sugerencias para este proyecto.

Quiero agradecer a la Dra. Maria por el apoyo brindado, tanto académico como personal, sus consejos me ayudaron en la culminación de este proyecto. Gracias por la confianza.

Quiero otorgar un agradecimiento y reconocimiento especial a Araceli Chamán, por siempre apoyarme en los papeleos del posgrado, por su paciencia y amabilidad.

Agradecimientos personales

Una vez más quiero agradecer a mi familia y amigos por todo el apoyo brindado. En especial, quiero otorgar el más grande de los agradecimientos a Luis, quien en los últimos dos años ha sido un gran apoyo, quien ha estado día y noche a pesar de la distancia, quien me ha tenido paciencia y se ha mantenido aquí con tanto amor y dedicación. Este logro no sólo es mío y hoy lo comparto contigo porque el tiempo y la distancia no nos ganó.

Agradezco a mi amiga y confidente de maestría: Griselda. Una vez más, este trabajo no lo hubiera logrado sin toda la ayuda y el apoyo que me brindaste. Muchísimas gracias.

Extiendo mi agradecimiento a mis amigos: Sandra, Edson y Julieta por echarme porras todo el tiempo y aún estado lejos seguir siendo tan buenos amigos.

También agradezco a mis nuevos amigos: Raúl, Alondra, Made y Viri por hacer amena mi estancia en Morelia.

Finalmente, quiero agradecer a mis abuelos: mi tita Rosa, mi tito Jesús, mamá Aurora y papá Benito porque son quienes estuvieron al pendiente de mí todo el tiempo que estuve lejos. Y por supuesto agradezco a mi madre y a mi hermana por dejarme volar fuera del nido.

Índice general

Resumen	IX
Abstract	XI
1. Introducción	1
1.1. Clima espacial y ionosfera	1
1.2. Motivación	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivo	4
1.5. Estructura de la tesis	4
2. Ionosfera terrestre y su estudio con receptores GPS	5
2.1. Estructura de la ionosfera	6
2.2. Variaciones de la ionosfera	8
2.2.1. Variaciones regulares	8
2.2.2. Variaciones irregulares	9
2.2.3. Perturbaciones de la ionosfera durante una tormenta geomagnética	10
2.2.3.1. Índice W	11
2.3. Uso de GNSS para el estudio de la ionosfera	12
2.3.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	13
2.3.2. Formatos RINEX	14
2.4. Cálculo de TEC	16
3. Programas para el cálculo de TEC	19
3.1. Global Ionospheric Maps	19
3.2. USTEC	22
3.2.1. MAGIC	22
3.2.2. Filtro Kalman	25
3.2.3. Modelo IRI	25
3.3. GPS-TEC por Gopi Krishna Seemala	26
4. Estudio de casos: análisis y resultados	29
4.1. Búsqueda y Recopilación de datos GPS	29
4.2. Comportamiento de TEC sobre México durante tormentas geomagnéticas	35
4.2.1. Evento del 1o. de marzo 2017	36

4.2.2. Evento 28 de mayo 2017	39
4.2.3. Evento 8 de Septiembre 2017	41
4.2.4. Evento 8 de Noviembre 2017	44
4.3. Validación de valores v TEC estimados con MAGIC	46
4.3.1. Calidad de los archivos RINEXobs	46
4.3.2. Comparación entre códigos	47
4.3.3. Cambio en la resolución espacial y temporal	51
4.4. Discusión	56
Conclusiones	59
4.5. Trabajo a futuro	62
A. Subrutinas de Magic-USTEC	63
A.1. GMAGIC	63
A.2. GPLOT	64
B. Software para revisar calidad de datos GPS	67
B.1. TEQC	67
B.2. GIPSY-OASIS	67
C. Comportamiento de vTEC sobre México: Gráficas individuales	69
Referencias	75

Índice de figuras

1.1. Fases de una tormenta geomagnética	3
2.1. Perfil atmosférico y ionosférico	5
2.2. Estructura de la ionosfera	6
2.3. Variación con el ciclo solar de la ionosfera	9
2.4. Estructura del formato RINEX	15
2.5. Esquema del cálculo de TEC en la ionosfera	16
3.1. Descripción de archivo IONEX	21
3.2. Productos de salida de USTEC	23
3.3. Ejemplo de las funciones ortonormales empíricas EOFs	24
3.4. Conceptos fundamentales del filtro de Kalman	25
4.1. Disponibilidad de estaciones GPS durante el año 2017	30
4.2. Mapa de estaciones GPSs	31
4.3. Análisis estadístico del vTEC para algunas estaciones GPS sobre México durante 2017	33
4.4. Análisis estadístico del vTEC para algunas estaciones GPS sobre México durante 2017	34
4.5. El Sol visto en rayos X suaves (193 Å) con el filtro Fe XII, que revela la presencia de un hoyo coronal durante el 1o. de marzo de 2017.	36
4.6. Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de marzo 2017	37
4.7. Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de marzo 2017	38
4.8. Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de mayo 2017	39
4.9. Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de mayo 2017	40
4.11. Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de septiembre 2017	43
4.12. Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de septiembre 2017	44
4.13. Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de noviembre 2017	45
4.14. Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de noviembre 2017	46
4.15. Comparación entre MAGIC y GPS-TEC en diferentes fases del CS24	48

4.16. Comparación entre MAGIC, GPS-TEC y GIM del 11 de noviembre de 2010 a 2019.	49
4.17. Funcionamiento del modelo IRI95 en MAGIC	51
4.18. Cambio de resolución espacial.	52
4.19. Comportamiento de vTEC con un cambio de resolución en GIM	54
4.20. Comportamiento del vTEC con diferentes mallas de estimación y número de estaciones	55
4.21. Comparación entre el ajuste que causa un mayor número de estaciones en la estimación de MAGIC.	56
A.1. Interfaz gráfica de gmagic	63
A.2. Interfaz gráfica de gplot	65
A.3. Matriz con datos vTEC sobre México	66
C.1. vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de marzo de 2017.	70
C.2. vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de mayo de 2017.	71
C.3. vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de septiembre de 2017.	72
C.4. vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de noviembre de 2017.	73

Índice de tablas

1.1. Clasificación de tormentas geomagnéticas según la intensidad del índice Dst . . .	3
2.1. Propiedades de las capas ionosféricas	8
2.2. Índice W con base en el valor DTEC	12
2.3. Sistemas GNSS	13
3.1. Resumen de los centros de análisis ionosférico	20
4.1. Estaciones GPSs y sus coordenadas geográficas.	31
4.2. Tormentas Geomagnéticas durante 2017.	36

Resumen

Esta tesis se analizan las variaciones del Contenido Total de Electrones vertical ($vTEC$, por sus siglas en inglés) sobre territorio mexicano derivado de datos provenientes del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) durante las tormentas geomagnéticas del 2017. Los valores $vTEC$ fueron estimados con el código MAGIC a partir de archivos RINEX de 22 estaciones GPS pertenecientes al Servicio Sismológico Nacional (SSN) y a TLALOCNet, y comparados con valores TEC extraídos de Mapas Ionosféricos Globales (GIM). Específicamente, se analizaron las tormentas geomagnéticas de intensidad moderada e intensa ocurridas el 27 de marzo, 28 de mayo, 8 de septiembre y 8 de noviembre de 2017 y la perturbación ionosférica asociada a éstos eventos se calculo mediante el índice W. Los resultados muestran que los valores TEC estimados con MAGIC tienen una discrepancia considerable de hasta $20 TECU$ en la mayoría de las estaciones analizadas, con respecto a los valores TEC de GIM. A pesar de que los valores TEC de MAGIC observados muestran un incremento o decremento respecto a los valores TEC esperados a 27 días, no se puede determinar la intensidad de la perturbación ionosférica durante el periodo de tormenta geomagnética a partir del índice W, a excepción de la tormenta de mayo de 2017 debido al desarrollo particular de ésta. Adicionalmente, se realizó una serie de pruebas propuestas para analizar la discrepancia encontrada en los datos de $vTEC$ obtenidos con MAGIC y GIM, que consisten en la comparación de valores TEC de un mismo día (11 de noviembre) de los años 2010 al 2019, que forman parte del Ciclo Solar 24. Las pruebas incluyeron: i) la comparación con valores $vTEC$ del código GPS-TEC para corroborar la influencia de los archivos RINEX, ii) el cambio en la resolución temporal y espacial para la estimación de valores $vTEC$; concluyendo que el programa MAGIC tiene fallos importantes que es imprescindible resolver para poder hacer un uso eficiente de este código tanto en tiempo desfasado como en tiempo real. Si bien este trabajo tiene aportaciones en la comprensión de la ionosfera sobre el territorio mexicano, su mayor aportación recae alrededor de la implementación y subsecuente funcionamiento del código MAGIC a lo largo de las diferentes fases del ciclo solar 24.

Abstract

In this work we analyzed the variations of the vertical Total Electron Content (vTEC) over Mexican territory derived from the Global Positioning System (GPS) data during the geomagnetic storms of 2017. The vTEC values were estimated with the MAGIC code from RINEX files of 22 GPS stations pertaining to the National Seismological Service (SSN) and TLALOCNet, and compared with TEC values extracted from Global Ionospheric Maps (GIM). Specifically, geomagnetic storms of moderate and intense intensity that occurred on March 27, May 28, September 8 and November 8, 2017 were analyzed and the ionospheric disturbance associated to these events was calculated using the W index. The results show that the vTEC values calculated with MAGIC have a considerable discrepancy of up to 20 TECU in most of the stations analyzed, with respect to the GIM vTEC values. Although the observed MAGIC TEC values show an increase or decrease with respect to the TEC values expected at 27 days, the intensity of the ionospheric disturbance during the geomagnetic storm period can't be determined from the W index, except for the May 2017 storm due to its particular development. Additionally, a series of proposed tests were carried out to analyze the discrepancy found in the vTEC data obtained with MAGIC and GIM, which consist of the comparison of TEC values from the same day (November 11) for the years 2010 to 2019, as part of Solar Cycle 24. The tests included: i) the comparison with vTEC values of the GPS-TEC code to corroborate the influence of RINEX files, ii) the change in the temporal and spatial resolution for the estimation of vTEC values; concluding that the MAGIC program has important flaws that it is essential to solve in order to make an efficient use of this code in both out-of-date and real time. If this work has contributions in the understanding of the ionosphere over the Mexican territory, its major contribution lies around the implementation and subsequent operation of the MAGIC code throughout the different phases of the solar cycle 24.

1.1. Clima espacial y ionosfera

El **clima espacial** ha sido un término comúnmente utilizado desde principio de la década de 1990 para describir las condiciones dinámicas y altamente variables en el entorno geoespacial incluidas las condiciones del Sol, el medio interplanetario y el sistema magnetosfera-ionosfera-atmosfera de la Tierra que pueden afectar el rendimiento y la confiabilidad de sistemas tecnológicos terrestres y espaciales (Baker, 1998). Los efectos del clima espacial son más prominentes durante las perturbaciones geomagnéticas, que a su vez, causan perturbaciones a la **ionosfera** (Blagoveshchenskii, 2013), por lo que la comprensión adecuada de este plasma es fundamental debido al papel preponderante que los sistemas de telecomunicaciones y navegación tienen al utilizar la ionosfera para operar.

La ionosfera es la parte ionizada de la atmósfera superior de la Tierra, donde se transmiten, refractan y reflejan las ondas de radio; se extiende desde altitudes aproximadamente 50 *km* hasta más de 1000 *km*. Su estructura y dinámica están esencialmente determinadas por la química de la atmósfera y varían con el tiempo y el espacio. Los procesos físicos principales para la formación de la ionosfera son la ionización y la recombinación y se ve afectada regularmente por la intensidad de la radiación solar y la geometría de su incidencia.

Las primeras sugerencias de capas electrificadas dentro de los niveles superiores de la atmósfera terrestre se remontan al siglo XIX, pero el interés se regeneró con los conocidos experimentos de Marconi para transmitir una señal de radio desde Cornwall en Inglaterra a Terranova en Canadá en 1901, y con la posterior sugerencia de Hennesly y Heaviside de que, debido a la curvatura de la Tierra, las ondas deben haberse reflejado desde una capa ionizada. El nombre de **ionosfera** fue acuñado por R. Watson-Watt en 1926, y entró en uso común alrededor de 1932 (Cairns, 1999).

El estudio de la ionosfera terrestre se basa, predominantemente, en técnicas de medida indirecta aprovechando el hecho de las ondas electromagnéticas, en presencia de un campo magnético, son modificadas durante su propagación al atravesar un medio ionizado. Una de estas técnicas mide el retraso de las señales de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) debido a su paso por la ionosfera. Éste retraso es proporcional al Contenido Total de Electrones (TEC, por sus siglas en inglés), definido como el número de electrones a

lo largo de la trayectoria de una onda entre un satélite y un receptor medido en electrones por m^2 ; de tal manera que el retraso de las señales debido a la ionosfera es una fuente de error importante en la navegación, posicionamiento y temporización del GPS.

El TEC varía en el tiempo y el espacio en razón del flujo de ionización solar, actividad magnética, ciclo de manchas solares, estación del año, hora del día y localización geográfica. En particular, durante eventos de **tormenta geomagnética** se presentan diversas inhomogeneidades y procesos en la ionosfera que se ven reflejados en los valores TEC.

Una tormenta geomagnética se desarrolla como resultado de la energía transferida del viento solar a la magnetosfera a través del mecanismo de reconexión magnética (Dungey, 1961) y se caracteriza por la disminución de la componente horizontal (H) del campo magnético de la Tierra y su posterior recuperación (Gonzalez *et al.*, 1994). El desarrollo de una tormenta geomagnética se da en tres fases (ver figura 1.1):

1. **Fase Inicial:** a menudo comienza con un SSC (Storm Sudden Commencement); en el que normalmente hay un aumento global y repentino de la componente H del campo geomagnético de 5 a $50 nT$, esta variación puede durar una o dos horas. Esta fase se atribuye al arribo de la onda de choque que comprime repentinamente la magnetosfera, debido a que la presión dinámica del viento solar aumenta.
2. **Fase Principal.** Después de que la componente H del campo magnético terrestre permanece positiva por algunos momentos, ésta disminuye drásticamente y alcanza un valor mínimo en un lapso de media hora a varias horas. Durante esta etapa se inyecta una gran cantidad de partículas en la magnetosfera interior, que contribuyen a la corriente de anillo y a la perturbación asociada del campo geomagnético. Para que esta fase se presente, es necesario que exista la componente sur del campo magnético interplanetario, la cual permite la reconexión magnética entre las líneas de campo magnético terrestre y las de campo magnético interplanetario.
3. **Fase de Recuperación:** Comienza uno o dos días después de la fase principal y dura varios días. Durante esta fase disminuye la corriente de anillo y el campo magnético vuelve a un estado tranquilo.

En latitudes bajas, la caída de la componente H del campo geomagnético atribuida al incremento de la corriente de anillo es representado por el **índice Dst** (Disturbance Storm Time). Este índice fue introducido por Sugiura en 1964 y se determina de manera regular a partir de un conjunto de 4 observatorios ubicados a la misma latitud dipolar, entre $\pm 20^\circ$ y $\pm 30^\circ$ lejos del ecuador magnético. Como se observa en la Tabla 1.1, el valor mínimo que alcanza el índice Dst durante una tormenta geomagnética determina la intensidad de ésta.

Aunque la respuesta de la ionosfera a una tormenta geomagnética no siempre es la misma, se conoce con certeza que existe una disminución prolongada en el TEC durante la fase principal de la tormenta geomagnética, especialmente en latitudes medias; así como aumentos de corta duración en el TEC durante la fase inicial de la tormenta geomagnética o antes de la disminución del mismo. Estos efectos a menudo se denominan tormentas ionosféricas (positivas si

Tormentas Geomagnéticas	
Categoría	Dst mínimo (nT)
Débil	$-30 \geq Dst \geq -50$
Moderada	$-50 \geq Dst \geq -100$
Intensa	$-100 \geq Dst \geq -200$
Supertormenta	$-200 \geq Dst$

Tabla 1.1: Clasificación de tormentas geomagnéticas según la intensidad del índice Dst (Gonzalez *et al.*, 1994).

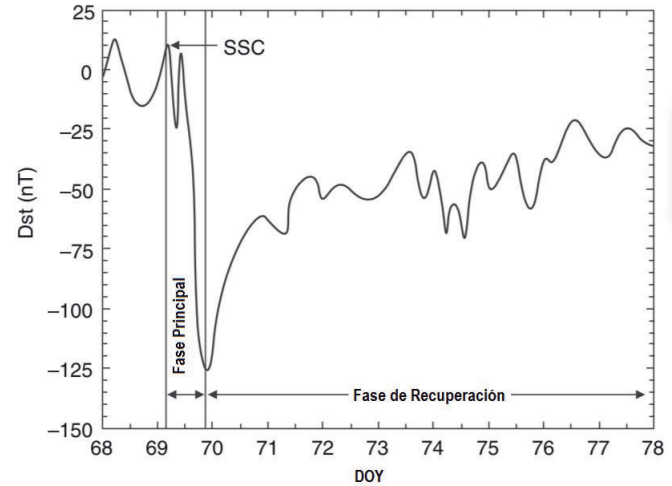


Figura 1.1: Fases de una tormenta geomagnética observadas en el índice Dst. Tomada de (Moldwin, 2008).

hay un incremento y negativas para los decrementos de TEC), para enfatizar una perturbación global del TEC (Blagoveshchenskii, 2013).

Los efectos de ionosfera ante tormentas geomagnéticas han sido bastante estudiados (Blagoveshchenskii, 2013; Buonsanto, 1999; Danilov y Morozova, 1985; Lastovicka, 2002; Pröls, 1993). En México, el estudio de la ionosfera ha ido en auge desde el establecimiento del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) y la consolidación del Laboratorio de Clima Espacial (LANCE) y el Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX) en 2015, sumando a trabajos previos (Gatica-Acevedo *et al.*, 2015; Lopez-Montes *et al.*, 2012, 2015; Rodríguez-Martínez *et al.*, 2014), una serie de nuevas investigaciones: De la Luz *et al.* (2018); Gonzalez-Esparza *et al.* (2018); Mendez-Bedolla (2019); Rodríguez-Martínez *et al.* (2017); Romero-Hernandez *et al.* (2018, 2017); Sergeeva *et al.* (2017, 2016, 2018), entre otros; en los que se han estudiado, principalmente, la variaciones del TEC ionosférico sobre México y su asociación a eventos de clima espacial como las tormentas geomagnéticas y fulguraciones.

1.2. Motivación

Aunque el estudio de la ionosfera terrestre a partir de datos de GPS no es reciente, en México estos estudios iniciaron hasta la segunda década del siglo en curso y, el monitoreo sistemático de la ionosfera comenzó con la conformación del LACIGE y del SCiESMEX. Por tal motivo, se requiere de más investigación para entender y caracterizar las variaciones del Contenido Total de Electrones sobre territorio mexicano, por lo que este trabajo de tesis se está motivado por buscar la forma de cuantificar y describir las variaciones que sufre la ionosfera ante eventos solares que producen tormentas geomagnéticas, así como revisar los productos de diferentes códigos que calculan el vTEC ionosférico.

1.3. Hipótesis

Las tormentas geomagnéticas alteran, bajo ciertas condiciones, el comportamiento ionosférico de la Tierra. Mediante el índice W puede caracterizarse el tipo de perturbaciones ionosféricas producidas; negativas o positivas, permitiendo correlacionar el tipo de tormenta geomagnética con la amplitud del cambio del índice W en las latitudes correspondientes al territorio mexicano.

La comparación de los valores de TEC sobre México calculados con diferentes métodos permite estimar la operación del software MAGIC para la producción de mapas regionales de TEC.

1.4. Objetivo

El desarrollo de este trabajo tiene como objetivo *estudiar el comportamiento del TEC haciendo uso de datos de estaciones fijas de GPS en territorio mexicano con la finalidad de conocer e identificar como influyen las tormentas geomagnéticas (intensas y moderadas) en el desarrollo de perturbaciones ionosféricas durante el año 2017.*

Como objetivos secundarios se buscará: i) la validación de los resultados de MAGIC para usarlos en la generación de mapas regionales de TEC; ii) la comparación del TEC obtenido mediante MAGIC, GIM y GPS-TEC (cuyos métodos de cálculo son diferentes); iii) evaluar la operación de MAGIC bajo diferentes condiciones (con/sin datos de entrada, en diferentes condiciones geomagnéticas, diferentes etapas del ciclo solar, etc).

1.5. Estructura de la tesis

En este **Capítulo 1** se ha presentado una introducción de las afectaciones del clima espacial a la ionosfera, en particular las tormentas geomagnéticas. En el **Capítulo 2** se describen las propiedades y variaciones más relevantes de la ionosfera. En este capítulo también se expone la relación entre la ionosfera y los sistemas GNSS y cómo se obtiene el cálculo del Contenido Total de Electrones. Un componente importante de este trabajo es el código MAGIC, con el que se obtendrán los valores de TEC sobre el territorio mexicano, es por ello que el **Capítulo 3** esta destinado para describir este código, además de los Mapas Ionosféricos Globales (GIM) y el código “GPS-TEC” del Dr. Gopi Seemala. Finalmente, en el **Capítulo 4** se presenta el desarrollo, análisis y resultados de este trabajo para concluir en el **Capítulo 5**.

Ionosfera terrestre y su estudio con receptores GPS

El término **ionosfera** se utiliza para distinguir la parte ionizada de la atmósfera superior de la Tierra (mesosfera, termosfera y exosfera), donde se transmiten, refractan y reflejan las ondas de radio (Cander, 2019; Chakraborty *et al.*, 2015; Ondoh y Marubashi, 2001). Mientras que las capas atmosféricas se definen por el perfil de temperatura (ver Figura 2.1), las capas ionosféricas se definen por el perfil de densidad de electrones. Se extiende desde altitudes de aproximadamente 50 km hasta más de 1000 km. La estructura y dinámica de la ionosfera están esencialmente determinadas por la química de la atmósfera y varían con el tiempo y el espacio. Los procesos físicos principales para la formación de la ionosfera son la ionización y la recombinación y se ve afectada regularmente por la actividad solar.

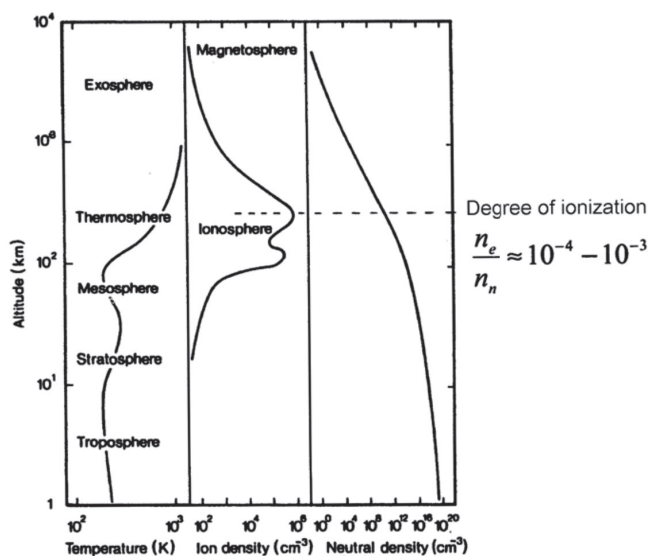


Figura 2.1: En esta Figura, en el primer panel de izquierda a derecha, se muestra el perfil de temperatura respecto a la altura de la atmósfera, así como las capas en que se divide. En el segundo panel se muestra el perfil de densidad de la ionosfera. En el último panel se muestra la densidad de átomos neutros en la atmósfera (Schlegel, 2007).

2.1. Estructura de la ionosfera

La estructura y la dinámica de la ionosfera de la Tierra están sujetas a grandes variaciones espaciales y temporales frecuentes, que pueden ser periódicas o irregulares. Los cambios que ocurren en la ionosfera son diferentes a distintas altitudes debido a los fenómenos de ionización, pérdida y transporte de partículas. La absorción de radiación EUV aumenta a medida que disminuye la altitud y el resultado neto de esto y el aumento de la densidad de moléculas neutras es la formación de una capa de máxima densidad de electrones. En consecuencia, la ionosfera terrestre se divide en distintas regiones o capas de densidad electrónica debido a las diferentes moléculas y átomos en la atmósfera y sus diferentes tasas de absorción. Estas regiones se indican con las letras D, E, F1 y F2 (ver Figura 2.2).

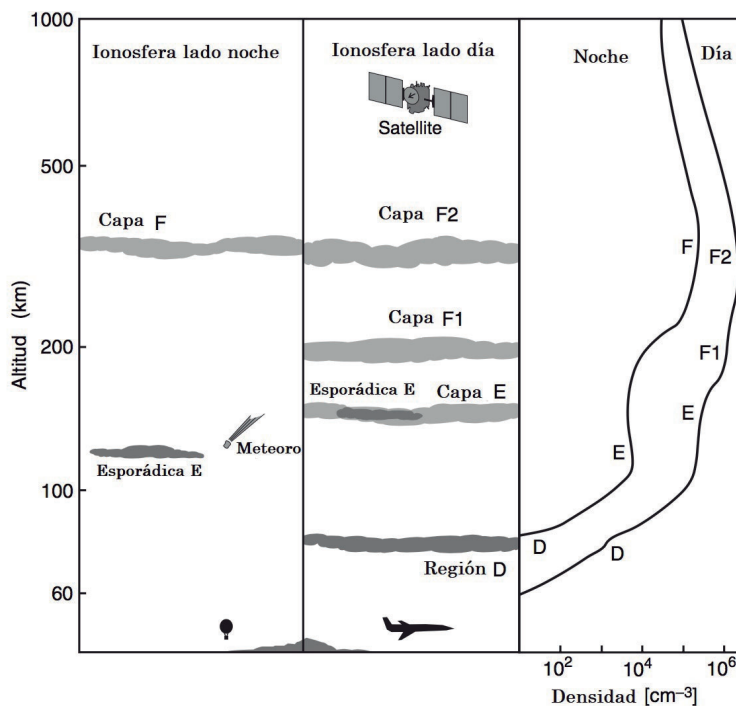


Figura 2.2: En la Figura se muestra la estructura de la ionosfera durante la noche y el día, así como el perfil de la densidad electrónica de ésta. Tomada de [Moldwin \(2008\)](#).

En la Tabla 2.1 se muestran las principales características de las capas ionosféricas y a continuación se presenta una breve descripción de cada una.

La **región D** es donde comienza la ionosfera, se localiza a una altitud aproximada de 50 a 90 km, producida principalmente por los rayos cósmicos y la radiación Lyman- α del hidrógeno ($\lambda = 121.5 \text{ nm}$). La recombinación en esta capa es alta, mientras la producción ionosférica es la más baja de toda la ionosfera. El componente ionizado de esta región es el óxido nítrico (NO^+). En general, la densidad electrónica de esta capa oscila entre $10^8 - 10^9 \text{ m}^{-3}$ dependiendo de la altura. En esta región la absorción de ondas de radio de 10 MHz es significativa, lo que resulta ser importante para el cálculo de la Lower Usable Frequency (LUF) ([Zolesi y Cander, 2014](#)),

ya que refleja señales con frecuencias inferiores a 2.5 MHz (Cairns, 1999).

A una altura de 90 km y hasta un límite superior de entre $120 - 150 \text{ km}$, encontramos la **región E**, y a veces la capa esporádica E (E_s). La ionización de esta capa es causada principalmente por rayos X suaves ($1 - 10 \text{ nm}$) y la radiación UV de 80 nm a Lyman- β (102.6 nm), produciendo principalmente NO^+ y O_2^+ . La densidad de electrones en esta capa es de $\sim 10^{11} \text{ m}^{-3}$ a una altura de 110 km . La capa E exhibe el comportamiento del modelo Chapman con máximo diario al mediodía local, máximo estacional en verano y dependencia del ciclo solar. Esta capa no desaparece por completo por la noche y permanece débilmente ionizada. Aquí las ondas de radio con frecuencias inferiores a 10 MHz son reflejadas.

La aparición de la capa E_s tiene una dependencia diurna, estacional y espacial; sin embargo, es muy delgada como para poder predecir su aparición. En latitudes bajas y medias ocurre principalmente durante el día y predominantemente durante los meses de verano. Su densidad electrónica máxima es comparable a la región F; por lo que puede refractar frecuencias similares a aquellas en la región F (oscureciendo totalmente la región F durante varias horas) o desvanecer las señales HF y VHF (high frequency and very high frequency, respectivamente). Las irregularidades dentro de esta capa pueden dispersar ondas de radio si sus dimensiones son comparables a la mitad de la longitud de onda de radio y a veces pueden producir centelleo de señales transionosféricas (Zolesi y Cander, 2014).

Seguido a la región D y E se encuentra la **región F**, la capa más importante desde el punto de vista de las telecomunicaciones por radio y los sistemas de navegación. Se extiende entre 150 y 600 km de altitud, ocasionalmente se extiende hasta los límites superiores de la ionosfera, mezclándose con la plasmaesfera. Como resultado de los complejos mecanismos físicos involucrados en su formación, la radiación solar hace que la región F se divida en dos capas separadas: F_1 y F_2 .

La **capa** F_1 tiene como principal fuente de ionización la radiación del extremo ultravioleta en las longitudes de onda entre 58.4 y 30.4 nm . La altura de F_1 varía con la actividad solar, la estación y la actividad geomagnética; es más pronunciada en verano que en invierno, siempre desaparece por la noche y, a veces, en invierno formando una sola capa F. Su principal componente ionizado es el NO^+ y O^+ . Alcanza una densidad electrónica de $\approx 2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ al mediodía.

Por su parte, la **capa** F_2 tiene la mayor concentración de electrones, es la más variable, la más anómala y la más difícil de predecir. La principal fuente de ionización es el proceso de fotoionización por radiación EUV en el rango de longitud de onda de 5 a 102.7 nm y tiene una densidad de electrones máxima entre 10^{10} y $8 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$. Los fotoelectrones producidos por la ionización son más calientes que los átomos neutros a partir de los cuales se formaron. Este exceso de energía se comparte gradualmente con los iones positivos, pero la transferencia al componente neutro es menos eficiente. En consecuencia, la temperatura del plasma excede la del aire neutral. De día, los electrones son considerablemente más calientes que los iones, pero de noche las temperaturas son más similares. Cuando el plasma está caliente, se mueve a altitudes más altas, donde se almacena efectivamente debido a la menor velocidad de recombinación con la altura. Cuando el plasma se enfría, por la noche, baja nuevamente y, por lo

tanto, ayuda a mantener la región F contra la pérdida por recombinación a altitudes más bajas.

Desde la perspectiva de las telecomunicaciones, la ionosfera puede dividirse en capas dependiendo de su frecuencia crítica. La frecuencia mínima de una onda electromagnética, en este caso las ondas de radio, para que la señal penetre en una capa ionosférica se denomina *frecuencia crítica* del plasma y se denota como f_o (f_oD , f_oE , f_oF1 y f_oF2 , respectivamente para cada capa). El cuadrado de la frecuencia crítica es linealmente proporcional a la densidad máxima de electrones de cada capa ionosférica y se indican mediante NmD , NmE , $NmF1$ y $NmF2$, respectivamente.

Región	Altura (km)	Densidad (m)	Frecuencia crítica (MHz)	Composición	Formación
D	50 – 90	$10^8 - 10^{10}$		NO^+ , O_2^+	L- α , Rayos X
E	90-150 $h_{max} \sim 110$	10^{11} (día) 10^{10} (noche)	~ 0.3 (día) ~ 3.0 (noche)	O_2^+ , NO^+	L- β , Rayos X
F1	150-210 $h_{max} \sim 180$	10^{11} (día)	$\sim 3 - 6$ (día)	O^+ , NO^+	He II, Radiación UV
F2	200-1000 $h_{max} \sim 300$	10^{12} (día) 10^{11} (noche)	$\sim 5 - 15$ (día) $\sim 3 - 6$ (noche)	O^+	Difusión ascendente de la capa F1, fotoionización

Tabla 2.1: Propiedades de las capas ionosféricas, de izquierda a derecha se presentan las regiones, su altitud, densidad, frecuencia crítica, componente predominante y fenómenos que las generan. Modificada de [Goodman \(2006\)](#).

2.2. Variaciones de la ionosfera

Como se ha mencionado anteriormente, la ionosfera sufre variaciones, las cuales podemos clasificar como regulares e irregulares.

2.2.1. Variaciones regulares

1. **Variaciones del ciclo solar.** Como su nombre lo indica, esta variación está marcada por el ciclo de manchas solares; a medida que el ciclo se acerca a su máximo la variación de la densidad ionosférica aumenta, mientras que durante baja actividad solar la densidad disminuye. Además, existe una clara tendencia a que las frecuencias críticas ionosféricas para la región E y F aumenten con el número de manchas solares. Así mismo, la absorción de la frecuencia 4 MHz en la capa D, es proporcional al número de manchas solares ([Goodman, 2006](#)), ver Figura [2.3](#).

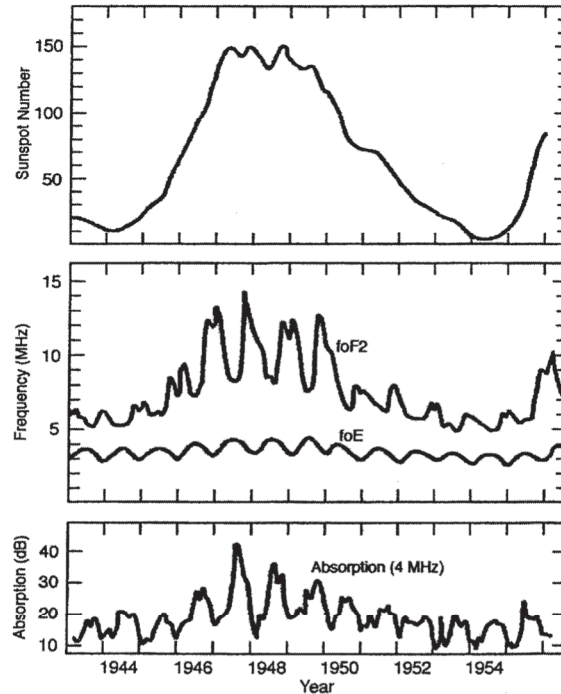


Figura 2.3: Variación con el ciclo solar de la ionosfera. De arriba hacia abajo se muestra el número de manchas solares por año, la frecuencia crítica en la región E y F, y la absorción de la frecuencia de 4 MHz en la región D. Los efectos estacionales son claramente evidentes, las variaciones de las capas foE y D están desfasadas con las variaciones de foF2. Tomada de [Goodman \(2006\)](#)

2. **Variaciones estacionales.** Son el resultado del movimiento de traslación terrestre alrededor del Sol. Debido a que el ángulo entre el Sol y el ecuador celeste varía entre $+23.5^\circ$ y -23.5° , la cantidad de luz solar que recibe el planeta varía, provocando que, durante el verano, cuando este ángulo es mayor, la densidad de iones aumente en las capas D, E y F1 y en invierno disminuya. En la capa F_2 , debido a la composición de la atmósfera neutra (O/N_2), ocurre lo contrario dando lugar a una *anomalía estacional*.
3. **Variación diurna.** Se debe a la rotación de la Tierra. Los procesos físicos que controlan la variación diurna de la densidad electrónica cambian con la hora local y la altitud. En el amanecer, la densidad electrónica comienza a incrementarse rápidamente debido a la fotoionización. La densidad sigue aumentando a través de las horas del día, y luego decae en el atardecer conforme la fuente de ionización desaparece. Todas las capas con excepción de la región F2, exhiben un pico en la concentración media de electrones en la vecindad temporal del mediodía local ([Goodman, 2006](#)).

2.2.2. Variaciones irregulares

Los efectos del clima espacial basados en la variabilidad solar a corto plazo son principalmente variaciones irregulares, las cuales son difícil de clasificar pero a continuación se describirán algunas.

Las **perturbaciones ionosféricas**, positivas y negativas, corresponden a un cambio en la densidad de electrones, aumentando o disminuyendo respecto del valor esperado. Estos cambios pueden estar asociados a cambios en la velocidad del viento termosférico o en la composición del gas neutro a un nivel local y en periodos de tiempo cortos.

Una perturbación en la densidad electrónica de la ionosfera a escala global se conoce como **tormenta ionosférica**, en la cual afecta particularmente en la capa F_2 . El estudio de estas perturbaciones se da principalmente mediante mapas diferenciales y algunos índices ionosféricos. Para este trabajo se empleará el índice W.

Las **perturbaciones ionosféricas viajeras** (TID, por sus siglas en inglés) son impulsadas por la propagación de ondas de gravedad acústicas (AWG, por sus siglas en inglés). La ocurrencia de las TID y la dirección del viaje muestran variaciones significativas en el ciclo diurno, estacional y de manchas solares. Se clasifican en dos tipos: TID de gran escala (LSTID) y TID de mediana escala (MSTID). Las MSTID tienen velocidades horizontales de 100 a 300 m/s , longitudes de onda de 200 a 500 km y períodos de onda de 15 min a 1 $hora$, mientras que las LSTID tienen velocidades horizontales de 300 a 1000 m/s , longitudes de onda de 1000 a 3000 km y períodos de onda de 1 a 2 $horas$. Las MSTID ocurren con más frecuencia que las LSTID. Los MSTID generalmente tienen velocidades, períodos y longitudes de onda más pequeñas y se propagan, principalmente, por fuentes desde abajo, como las AGW. Por el contrario, las LSTID tienen mayores velocidades, períodos y longitudes de onda y generalmente se desencadenan por el calentamiento relacionado con los procesos aurorales durante las tormentas geomagnéticas (Jonah *et al.*, 2018).

2.2.3. Perturbaciones de la ionosfera durante una tormenta geomagnética

De acuerdo con Buonsanto (1999), una tormenta geomagnética contribuye de la siguiente manera para producir variaciones significativas sobre la ionosfera:

1. Aumento de la precipitación de partículas de alta energía.
2. Corrientes eléctricas ionosféricas más intensas y calentamiento de Joule resultante.
3. Campos eléctricos intensificados, principalmente de origen magnetosférico.
4. A altas latitudes, el calentamiento por fricción es inducido por el aumento de la convección magnetosférica.

Particularmente, Lastovicka (2002) describe los efectos de las tormentas geomagnéticas sobre cada capa de la ionosfera y diferentes latitudes:

1. El efecto sobre el TEC de una tormenta geomagnética a latitudes medias depende de la estación del año. Mientras que en verano se puede observar un pequeño aumento del TEC seguido de una disminución pronunciada del mismo, en invierno se observa una fase positiva, es decir, un aumento del TEC.

2. La región de la ionosfera mayormente afectada durante una tormenta geomagnética es la F2 debido a la respuesta termosférica debida a los cambios de composición neutra y sistema de viento. Tanto la fase positiva como la negativa de la tormenta ionosférica dependen de la latitud, la estación y la hora local.
3. En la región F_1 y E, el efecto de tormenta geomagnética es menos pronunciado. Su naturaleza es una mezcla de respuesta a la tormenta termosférica y al aumento directo de la tasa de ionización debido a la mayor precipitación de partículas.
4. La ionosfera más baja, donde la respuesta ionosférica es mayor, sufre un aumento en la densidad de electrones, principalmente debido a la ionización por la precipitación directa de partículas. Esta es una región extremadamente variable, particularmente en latitudes altas.

En latitudes medias, se cree que los vientos termosféricos y los campos electromagnéticos juegan un papel dominante en los cambios del plasma ionosférico que se observan en las variaciones temporales y espaciales de foF2 y TEC. Las tormentas negativas se han atribuido a cambios en la relación de densidad atómica a molecular neutral. Generalmente, se cree que las fases positivas son causadas por la elevación de la región F por los vientos hacia el ecuador en las primeras horas del desarrollo de una tormenta. El contenido de plasma del lado día se reduce significativamente en las regiones adyacentes a la estructura de densidad mejorada por la tormenta, lo que aumenta el contenido de electrones (Cander, 2008).

2.2.3.1. Índice W

El índice W revela el comportamiento del TEC que varía desde un estado tranquilo hasta una tormenta intensa, proporcionando un índice útil que determina el clima espacial en el entorno de la ionosfera-plasmaesfera en lugar de los índices geomagnéticos.

Generalmente, el grado de perturbación se determina a partir del valor medio de TEC estimado durante un período geomagnético quieto, es decir, en ausencia de efectos solares o geomagnéticos. El índice W se basa en el cálculo de la desviación TEC (DTEC) con respecto a la mediana de TEC (TECmed) que representa el estado de la ionosfera tranquila (Gulyaeva y Stanislawska, 2008).

$$DTEC = \log \frac{TEC}{medTEC}. \quad (2.1)$$

TECmed se obtiene a partir de los 27 días previos, correspondiente a la rotación solar. El signo de DTEC especifica la fase de la perturbación ionosférica, positiva corresponde al enriquecimiento del plasma y negativa a reducciones del plasma. De manera similar a los índices magnéticos, la descripción del estado ionosférico es proporcionada por 4 niveles de índice W: estado quieto, perturbación débil, tormenta moderada o tormenta intensa asignados para umbrales específicos de DTEC como se muestra en la Tabla 2.2.

DTEC	Índice W	Categoría del estado ionosférico
$DTEC > 0.301$	+4	Tormenta positiva intensa
$0.155 < DTEC \leq 0.301$	+3	Tormenta positiva moderada o subtormenta
$0.046 < DTEC \leq 0.155$	+2	Perturbación positiva débil
$0 < DTEC \leq 0.046$	+1	Estado quieto
$DTEC = 0$	0	Estado quieto de referencia
$-0.046 \leq DTEC < 0$	-1	Estado quieto
$-0.155 \leq DTEC < 0.046$	-2	Perturbación negativa débil
$-0.301 \leq DTEC < 0.155$	-3	Tormenta negativa moderada
$DTEC < -0.301$	-4	Tormenta negativa intensa

Tabla 2.2: Categoría del estado ionosférico mediante el índice W correspondiente con DTEC (Gulyaeva y Stanislawski, 2008).

2.3. Uso de GNSS para el estudio de la ionosfera

Los Global Navigation Satellite Systems (GNSS) son el conjunto de elementos desplegados en tierra y en el espacio, que tienen como misión proporcionar el servicio de posicionamiento-navegación-temporización por medio de señales electromagnéticas (Gatica-Acevedo *et al.*, 2015). Las principales constelaciones GNSS están conformadas por los sistemas GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou y algunos otros sistemas regionales como NavIC y QZSS. En la Tabla 2.3 se enlistan sus principales características.

Los GNSS son vulnerables a las condiciones de clima espacial, la ionosfera es la principal fuente de inexactitud para los sistemas GNSS, debido a sus efectos sobre la propagación de señales a través del entorno de la Tierra ya que generan un retraso en la señal que es proporcional al TEC en la ionosfera. Sin embargo, esta afectación ha permitido utilizar a los GNSS como una herramienta para la vigilancia ionosférica. Para este trabajo se utilizó la red GPS, del que se hablara a continuación.

Las señales GNSS son ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Se han seleccionado frecuencias de señal en el espectro de radio entre 1.2 y 1.6 GHz (la denominada banda L), ya que permiten mediciones de precisión. La característica distintiva de todas las señales GNSS es la modulación de la onda de radio armónica (denominada portadora) con un código de ruido pseudoaleatorio característico (PRN, por sus siglas en inglés). Este código es esencialmente una secuencia binaria de ceros y unos que se transmite a una velocidad típica entre 1 y 10 MHz, donde velocidades más altas implican un mayor esfuerzo de procesamiento pero prometen mediciones más precisas. El código PRN se repite continuamente a intervalos de unos pocos milisegundos a segundos y facilita las mediciones del tiempo de transmisión de la señal. En la mayoría de los GNSS, la secuencia PRN también sirve como una huella digital única, que permite al receptor distinguir los satélites individuales que transmiten en la misma frecuencia (Teunissen y Montenbruck, 2017).

Tabla 2.3: Sistemas GNSS y sus principales características. Tomada de [Teunissen y Montenbruck \(2017\)](#).

Sistema GNSS	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	NavIC
Tipo de Órbita	MEO ^a	MEO	MEO, IG-SO ^b , GEO ^c	MEO	IGSO, GEO	IGSO, GEO
Número de Satélites	24	24	33	30	4	7
Servicios	SPS ^d , PPS ^e	SPS, PPS	OS ^f , AS ^g , WADS ^h , SMS ⁱ	OS, CS ^j , PRS ^k	GCS ^l , GAS ^m , PRS, EWS ⁿ , MCS ^ñ	SPS, RS ^o
Inicio de funcionamiento	Dic 1993	Sep 1993	Dic 2012	2016-2017	2018	2016
Origen	EUA	Rusia	China	Europa	Japón	India
Cobertura	Global	Global	Global	Global	Este de Asia y Región de Oceanía	-30° <lat< 50° 30° <long< 130°
Frecuencia (MHz)	L1 (1575.42) L2 (1227.60) L5 (1176.45)	L1 (1602.00) L2 (1246.00) L3 (1202.02)	B1 (1561.09) B2 (1207.14) B3 (1268.52)	E1 (1575.42) E5a (1176.45) E5b (1207.14) E6 (1278.75)	L1 (1575.42) L2 (1227.60) L5 (1176.45) E6 (1278.75)	L5 (1176.45) S (2492.02)

^aÓrbita Terrestre Media^bÓrbita Geosíncrona Inclinada^cÓrbita Geoestacionaria^dServicio de posicionamiento estándar^eServicio de Posicionamiento Preciso^fServicio Abierto^gServicio Autorizado^hServicio diferencial de área ampliaⁱServicio de mensajes cortos^jServicio comercial^kServicio Público Regulado^lServicio complementario de GPS^mServicio de aumento de GPSⁿServicio de alerta temprana^ñServicio de comunicaciones de mensajes^oServicio restringido

2.3.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de navegación basado en tecnología satelital. Su técnica fundamental es medir los rangos (distancias) entre el receptor y algunos satélites observados simultáneamente, y las posiciones de los satélites se pronostican y transmiten junto con la señal GPS al usuario. A través de varias posiciones conocidas (de los satélites)

y las distancias medidas entre el receptor y los satélites, se puede determinar la posición del receptor. El cambio de posición, que también se puede determinar, es entonces la velocidad del receptor. Las aplicaciones más importantes del GPS son el posicionamiento y la navegación (Xu y Xu, 2016).

GPS fue el primer GNSS puesto en marcha (Charles, 2010). Fue lanzado a fines de la década de 1970 por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. La constelación GPS consta de 24 satélites en seis planos orbitales, con cuatro satélites en cada plano y proporciona cobertura global.

Cada satélite GPS transmite datos en tres frecuencias: L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) y L5 (1176.45 MHz) (Teunissen y Montenbruck, 2017; Xu y Xu, 2016). Las frecuencias portadoras L1, L2 y L5 se generan multiplicando la frecuencia fundamental ($L = 10.23 \text{ MHz}$) por 154, 120 y 115, respectivamente. Los PRN, junto con efemérides satelitales, modelos ionosféricos y correcciones de reloj satelital se superponen a las frecuencias portadoras L1, L2 y L5. Los tiempos de transmisión medidos de las señales que viajan desde los satélites a los receptores se utilizan para calcular los pseudorángos. El código de curso/adquisición (C/A), a veces llamado Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), es un código de ruido pseudoaleatorio que se modula en la portadora L1. El código de precisión (P), a veces llamado Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS), se modula en las portadoras L1, L2 y L5, lo que permite la eliminación de los efectos de la ionosfera.

2.3.2. Formatos RINEX

Los formatos GNSS actuales admiten metadatos tales como información de calibración de estaciones, receptores, antenas y equipos GNSS, observación de GNSS e información de navegación de difusión y también productos GNSS como órbitas precisas, correcciones de reloj, mediciones atmosféricas y coordenadas de estación. Los estándares RINEX, BINEX e IGS han sido ampliamente aceptados y se han convertido en estándares de cabecera (Teunissen y Montenbruck, 2017).

En este trabajo se empleó el formato RINEX (Receiver INdependent EXchange), desarrollado por Werner Gurtner del Instituto Astronómico de la Universidad de Berna en 1989 para el fácil intercambio de los datos GPS.

Para admitir tanto la lectura humana como la máquina, todos los archivos de datos RINEX emplean formatos de texto ASCII imprimibles con anchos de campo predefinidos para datos y etiquetas. El formato RINEX, más reciente es la versión 3.XX, que consta de tres tipos de archivos ASCII:

1. Archivo de datos de observación (RINEXobs).
2. Archivo de mensajes de navegación.
3. Archivo de datos meteorológicos.

Para el desarrollo de este trabajo se emplearon los archivos RINEX observacionales (RINEXobs), que como se ilustra en la Figura 2.4, cuentan con un encabezado, el cual comienza con dos líneas que identifican el tipo de archivo: la versión del formato RINEX observacional así como detalles de su generación. Las siguientes líneas en color rojo, muestran los metadatos de la estación: la agencia encargada, el equipo empleado (receptor REC#, antena ANT#); un nombre de marcador de cuatro letras, las coordenadas aproximadas y, finalmente, el desplazamiento del punto de referencia de la antena con respecto a las coordenadas.

2.11	OBSERVATION DATA	G (GPS)	RINEX VERSION / TYPE	}	Inicio del encabezado						
teqc 2018Mar15		20190903 17:32:50UTC	PGM / RUN BY / DATE								
Servicio SismologicoSSN, Instituto de Geofisica, UNAM			OBSERVER / AGENCY	}	Metadatos del sitio						
4912167717	TRIMBLE NETRS	5.10	REC # / TYPE / VERS								
60142013	TRM57971.00	NONE	ANT # / TYPE								
DEMA Demagu			MARKER NAME								
-940103.4207	-5911964.3658	2199602.9584	APPROX POSITION XYZ	}	Tipo de observación Rango de observación						
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N								
1	1		WAVELENGTH FACT L1/2								
5	L1	L2	P1	P2	C1		GPS	# / TYPES OF OBSERV	→		
2017	1	1	0	0	0.0000000			TIME OF FIRST OBS	→		
Linux 2.6.32-573.12.1.x86_64 x86_64 gcc Linux 64 +=								COMMENT	}	Comentarios	
2	OBSERVATION DATA							COMMENT			
Geodetics RTD 3.5 EV			20161231	23:59:32UTC				COMMENT	}	Final del encabezado	
								END OF HEADER			
17	1	1	0	0	0.0000000	0	10G09G16G23G14G08G03G31G22G26G27	24271246.515	24271253.885	}	Mediciones
								24271246.515	24271253.885		
								20361688.678	20361699.037		
								21710135.785	21710148.137		
								23751317.128	23751325.377		
								24043005.723	24043012.213		
								20878498.561	20878505.286		
								25092781.735	25092791.566		
								21038312.526	21038323.998		
								22449494.762	22449500.256		
								22724320.011	22724327.674		
17	1	1	0	0	30.0000000	0	10G09G16G23G14G08G03G31G22G26G27	24254497.682	24254504.525	}	Mediciones
								24254497.682	24254504.525		
								20369729.290	20369740.177		
								21696922.178	21696933.944		

Figura 2.4: Ejemplo de la estructura de los archivos en formato RINEX observacional.

Además, muestra el tipo de observaciones y el orden en que se encuentran (renglón en color azul), así como el primer tiempo de observación. En algunas ocasiones se indica el periodo de observación, en este caso la línea en color verde indica el primer tiempo de observación en formato AAAA-MM-DD HH-MM-SS Tiempo Universal (UTC). En algunos casos el encabezado cuenta con algunos comentarios y este termina con la leyenda "END OF HEADER".

Las siguientes líneas corresponden al cuerpo del archivo, es decir, a las mediciones. En color morado podemos observar el tiempo de observación en formato AAAA MM DD HH MM SS. A continuación, en color amarillo, se indica el número de satélites observados por el receptor, seguido de los identificadores de los satélites observados. Cada constelación tiene un identificador diferente, en este caso la letra G corresponde a la constelación GPS.

Las líneas posteriores corresponden a la medición de cada satélite (sí son 10 satélites hay 10 líneas), y cada columna de datos corresponde con las frecuencias que se indican del tipo de observación. Una vez registradas las observaciones de cada satélite comienza un nuevo tiempo

de observación hasta cubrir las observación para un día completo.

En el archivo de datos de la observación la pseudodistancia o pseudorange se mide en metros. Se aceptan tres tipos de pseudoranges, C1 (código C/A o estándar sobre la frecuencia L1), P1 (código P o Precise en L1) y P2 (código P en L2). Algunos receptores no recogen observaciones sobre la frecuencia L2 bajo A/S, dado que en este caso el código P es encriptado pasando a ser el código Y; si se dispone de un descriptador, el RINEX es capaz de generar un código P2 sintético, pero de todas formas estas observaciones deben ser marcadas como afectadas por el A/S.

2.4. Cálculo de TEC

Con el desarrollo de las técnicas modernas de comunicación, la informática, la ciencia espacial, etc., la influencia de la ionosfera en la vida humana ha crecido enormemente desde la década de 1950, particularmente la existencia de GNSS. El retraso ionosférico es una de las fuentes de error importantes en la navegación, posicionamiento y temporización GNSS. En contraste, los retrasos ionosféricos se pueden extraer de las observaciones GNSS de doble frecuencia, que tienen una amplia aplicación en el clima espacial y la física espacial.

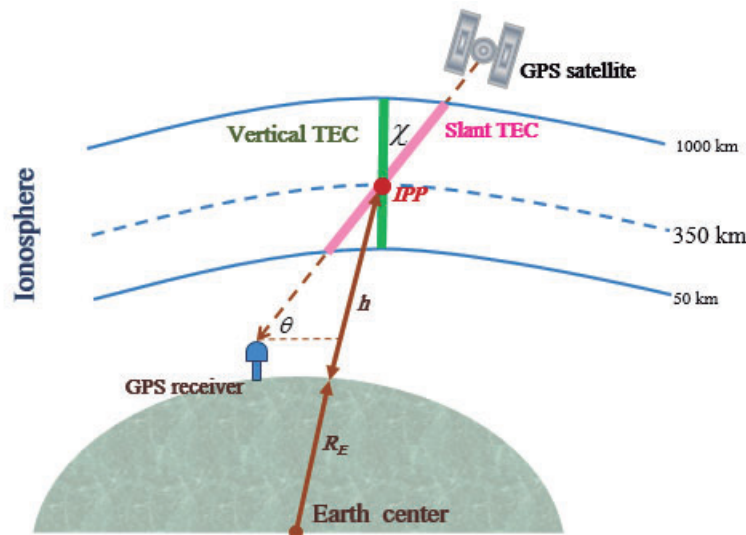


Figura 2.5: Esquema del cálculo de TEC en la ionosfera. Representación de la trayectoria de una señal de radio entre un satélite y un receptor; así como la representación del vTEC y sTEC. Tomada de http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243

El efecto principal de la ionosfera en las señales GNSS es cambiar la velocidad de propagación de la señal en comparación con la del espacio libre. Un hecho curioso es que la modulación de la señal (el código y el flujo de datos) se retrasa, mientras que la fase portadora avanza en la misma cantidad. Por lo tanto, el pseudorange medido utilizando el código es mayor que el valor correcto, mientras que el uso de la fase portadora es igualmente menor. La magnitud de cualquiera de los errores es directamente proporcional al TEC en un tubo de sección transversal

de $1 m^2$ a lo largo de la ruta de propagación, como se muestra en la Figura 2.5. El TEC varía espacialmente debido a la no homogeneidad espacial de la ionosfera. Las variaciones temporales son causadas no solo por la dinámica ionosférica sino también por los rápidos cambios en la ruta de propagación debido al movimiento del satélite. El retraso de la trayectoria de un satélite en el cenit generalmente varía aproximadamente $1 m$ por la noche y de $5-15 m$ durante la tarde. Para ángulos de elevación bajos, la trayectoria de propagación a través de la ionosfera es mucho más larga, por lo que los retrasos típicos pueden aumentar a varios metros por la noche y hasta $50 m$ durante el día (Grewal *et al.*, 2020).

Actualmente, el retraso ionosférico es una de las principales fuentes de error en la medición GNSS, que debe considerarse cuidadosamente para aplicaciones GNSS de mayor precisión. Aquí se presentan la teoría y la estimación del retraso ionosférico GNSS en tierra.

La ionosfera es un medio dispersivo. El índice de refracción de la fase n_p y el grupo n_g pueden escribirse como:

$$n_p = 1 - 40.3 \frac{N_e}{f^2} + \frac{c_1}{f^3} + \frac{c_2}{f^4}, \quad (2.2)$$

$$n_g = 1 + 40.3 \frac{N_e}{f^2} + \frac{c_1}{f^3} + \frac{c_2}{f^4}; \quad (2.3)$$

donde N_e es la concentración libre de electrones (em^{-3}), f , es la frecuencia de la señal en Hz y c_i , coeficientes independientes de la frecuencia de la señal. Si las frecuencias portadoras utilizadas por GNSS son mayores que $1 GHz$, despreciamos el término en f^{-3} , f^{-4} , etc.

El error de rango o de distancia (I) debido a la ionosfera se puede calcular fácilmente. Si descuidamos los efectos de flexión de la trayectoria, la diferencia (debido a la ionosfera) entre el rango medido usando observaciones de código y el rango geométrico (en vacío) del satélite i al receptor p viene dada por:

$$I_g = \int_p^i n_g ds - \int_p^i ds = \int_p^i (n_g - 1) ds \quad (2.4)$$

usando la expresión de n_g en la ecuación 2.2:

$$I_g = \frac{40.3}{f^2} \int_p^i N_e ds \quad (2.5)$$

de la misma forma, el error de rango en la de fase portadora viene dado por:

$$I_p = \int_p^i (n_p - 1) ds = -\frac{40.3}{f^2} \int_p^i N_e ds \quad (2.6)$$

por lo que podemos ver que:

$$I_g = -I_p \quad (2.7)$$

Definimos entonces

$$I \equiv I_g = -I_p. \quad (2.8)$$

y

$$TEC = \int_p^i N_e ds. \quad (2.9)$$

Por lo que la ecuación 2.5 se escribe ahora como:

$$I = \frac{40.3}{f^2} TEC. \quad (2.10)$$

El **Contenido Total de Electrones** se mide en e/m^2 o en unidades TEC (TECU) con $1TECU = 10^{16}e/m^2$. A partir de esta ecuación, se puede ver que un TEC de 1 TECU es responsable de un rango de error de aproximadamente 16 m para la frecuencia L1. Supongamos que la ionosfera se puede modelar como una capa de grosor infinitesimal a una altura media, h_{iono} (entre 350 y 400 km). La intersección entre la línea de visión del satélite y esta capa infinitesimal se llama punto ionosférico (IP). La relación entre TEC inclinado (sTEC) y TEC vertical (vTEC) viene dada por:

$$TEC \equiv \frac{vTEC}{\cos(Z_{IP})}, \quad (2.11)$$

donde $\cos(Z_{IP})$, es el coseno del ángulo cenital del satélite medido en el punto ionosférico [Lilensten \(2007\)](#).

Para obtener valores TEC absolutos, el retraso de la señal o el error de rango deben calcularse a partir de las fases del código de diferenciación. Dado que los tiempos de viaje relacionados con el enlace están sesgados por los retrasos instrumentales en el satélite y en el receptor, los datos de TEC derivados deben calibrarse (por ejemplo, mediante una técnica de filtro de Kalman del que se hablará más adelante); debido a que las mediciones de fase portadora son mucho menos ruidosas que las mediciones de código ([Arbesser-Rastburg y Jakowski, 2007](#)).

En conclusión, el TEC es un parámetro relevante para determinar el retraso y los cambios direccionales de una onda en la ionosfera. Varios grupos han desarrollado técnicas para derivar mapas de TEC a partir de datos de mediciones de doble frecuencia GPS ([Bothmer y Daglis, 2007](#)). Por lo tanto al conocer el retardo de las señales en la ionosfera, el clima espacial puede estudiar el estado de la ionosfera por medio del contenido total de electrones y generar mapas numéricos de la ionosfera basados en los valores observados de TEC sobre una región o globalmente.

Programas para el cálculo de TEC

Debido a la complejidad de la ionosfera, se han desarrollado diversos enfoques para el modelado ionosférico, como son:

1. Modelos empíricos: se basan en mediciones ionosféricas recopiladas durante un periodo de tiempo prolongado que se ajustan con funciones analíticas y empíricas simples.
2. Modelos numéricos: son principalmente, mapas generados en escala global o regional, que proporcionan valores de un parámetro atmosférico en una cuadrícula.
3. Modelos analíticos: se basan en ajustes de funciones ortonormales a la salida obtenida de modelos numéricos.
4. Modelos físicos: se desarrollan basándose en la solución típica de la ecuación de continuidad o de las ecuaciones de momento y energía para los electrones e iones (Memarzadeh, 2009).

En general, los modelos 2, 3 y 4 son útiles cuando se trata de calcular, corroborar y comparar el comportamiento de la ionosfera para ubicaciones y momentos en los que no se dispone de observaciones empíricas (Okoh *et al.*, 2018). Sin embargo, el estudio de la ionosfera y sus variaciones se basa principalmente en modelos empíricos, incluidos los modelos de autocorrelación y asimilación de datos, con los que se busca corregir errores de propagación ionosférica para mediciones de frecuencia única en términos del TEC (Hobiger y Jakowski, 2017). Este tipo de investigaciones han permitido determinar valores del modelo de ionosfera en tiempo real, pero la precisión de nuevos modelos requiere una evaluación adicional (Minter *et al.*, 2007).

El desarrollo de este trabajo, implica el uso de modelos numéricos como GIM y MAGIC que determinan mapas TEC; los cuales hacen uso de modelos analíticos y empíricos como el modelo IRI.

3.1. Global Ionospheric Maps

El International GNSS Service (IGS) de la International Association for Geodesy (IAG) mantiene una red global de seguimiento GNSS de más de 200 receptores que ha permitido vigilar, globalmente, la ionosfera (Hernández-Pajares *et al.*, 2009). Desde 1998, los Ionosphere Associate

Analysis Centers (IAACs) del IGS, principalmente CODE, ESA, JPL y UPC, han proporcionado productos que contienen mapas de ν TEC, conocidos como Mapas Ionosféricos Globales (GIM, por sus siglas en inglés) y valores diarios de sesgo de código diferencial de satélite (DCB, por su siglas en inglés) derivados de los datos GNSS de doble frecuencia.

ID GIMs	Centro encargado	Método		GNSSs	Resolución Tempo- ral	Fecha de ini- cio
UPCG	Universidad Politécnica de Cataluña	Tomografía con splines	Modelo basado en una sola estación	GPS	1h, 2h	1998
CODG	Center for Orbit Determination in Europe	Armónicos esféricos	Modelo global	GPS+GLONASS	1h, 2h	1998
JPLG	Jet Propulsion Laboratory	Modelo de tres capas	Modelo global	GPS	2h	1998
ESAG	European Space Operations Center for European Space Agency	Armónicos Esféricos	Modelo global	GPS	2h	1998
IGSG	International GNSS Service	Media ponderada			2h	1998

Tabla 3.1: Resumen de los Centros de Análisis Ionosférico. Tomada y modificada de [Chen et al. \(2020\)](#).

En la Tabla 3.1, tomada de [Chen et al. \(2020\)](#); se resumen las características de los mapas publicados por los cuatro IAACs y el IGS. El producto oficial IGS es un mapa combinado de la ionosfera de los cuatro centros. Los GIMs están disponibles en soluciones rápidas con una latencia de menos de 24 horas, una solución final con una latencia de aproximadamente 11 días y una solución prevista, disponible entre uno o dos días antes. Los GIMs se proporcionan en formato IONEX (IONosphere map EXchange) ([CDDIS-NASA, 2014](#)), con una resolución temporal de 1 o 2 horas y una resolución espacial de 5° de longitud y 2.5° de latitud en todo el mundo.

Cada archivo IONEX consta de una sección de encabezado y una sección de datos (ver Figura 3.1). La sección de encabezado contiene información global para todo el archivo y se coloca al principio de este. La sección de datos está conformada por tres tipos de mapas: 1) TEC Map, 2) RMS Map y 3) HEIGHT Map; para cada uno se indica el tiempo (EPOCH), latitud (LAT), longitud (LON), altura (HGT) y el tipo de mapa ([gAGE, 2017](#); [Schauer et al., 1998](#)).

Finalmente, cabe mencionar que los GIM tienen ventajas y desventajas importantes para el estudio ionosférico sobre México. Las principales desventajas son: (i) disponibilidad de archivos IONEX con un retraso mínimo de tres días, (ii) baja resolución temporal (1 o 2 horas), (iii) falta de receptores mexicanos en la red terrestre del IGS (sólo se cuenta con uno) y además los GIM presentan una menor intensidad de respuesta a los eventos de clima espacial: cuanto más intensa es la perturbación, más pronunciada es la diferencia en TEC por dos métodos ([Sergeeva et al., 2018](#)). Sin embargo, se pueden utilizar cuando existe un vacío de datos locales o para el análisis durante décadas anteriores.


```

1.0 IONOSPHERE MAPS GPS IONEX VERSION / TYPE
BLANK OR G = GPS, R = GLONASS, E = GALILEO, M = MIXED COMMENT
LAB gAGE / UPC 17-MAR-10 12:14 PGM / RUN BY / DATE
GLOBAL IONOSPHERE MAP FOR DAY 288 OF YEAR 1995 DESCRIPTION
SPHERICAL HARMONICS ARE USED IN THIS MODEL DESCRIPTION
THIS EXAMPLE OF IONEX FILE IS PART OF THE gLAB TOOL SUITE COMMENT
FILE PREPARED BY: ADRIA ROVIRA GARCIA COMMENT
PLEASE EMAIL ANY COMMENT OR REQUEST TO: g1ab.gage@upc.edu COMMENT
1995 10 15 0 0 0 EPOCH OF FIRST MAP
1995 10 16 0 0 0 EPOCH OF LAST MAP
21600 INTERVAL
5 # OF MAPS IN FILE
COSZ MAPPING FUNCTION
20.0 ELEVATION CUTOFF
DOUBLE-DIFFERENCES CARRIER PHASE OBSERVABLES USED
80 # OF STATIONS
24 # OF SATELLITES
6371.0 BASE RADIUS
3 MAP DIMENSION
200.0 800.0 50.0 HGT1 / HGT2 / DHGT
85.0 -85.0 -5.0 LAT1 / LAT2 / DLAT
0.0 355.0 5.0 LON1 / LON2 / DLON
-3 EXPONENT
DIFFERENTIAL CODE BIASES START OF AUX DATA
G01 1.311 0.394 PRN / BIAS / RMS
G02 5.279 0.167 PRN / BIAS / RMS
... PRN / BIAS / RMS
G31 -0.637 0.213 PRN / BIAS / RMS
P1 - P2 DIFFERENTIAL CODE BIASES (DCB) COMMENT
BIASES & RMS UNITS: NANSECS OF DELAY IN GEOMETRY FREE COMB. COMMENT
THE SUM OF BIASES IS CONSTRAINED TO ZERO COMMENT
DIFFERENTIAL CODE BIASES END OF AUX DATA
END OF HEADER

1 START OF TEC MAP
1995 10 15 0 0 0 EPOCH OF CURRENT MAP
-3 EXPONENT
85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
80.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
... LAT/LON1/LON2/DLON/H
-85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
5 END OF TEC MAP
1 START OF RMS MAP
85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
80.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
... LAT/LON1/LON2/DLON/H
-85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
5 END OF RMS MAP
1 START OF HEIGHT MAP
85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
80.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
... LAT/LON1/LON2/DLON/H
-85.0 0.0 355.0 5.0 200.0 LAT/LON1/LON2/DLON/H
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
5 END OF HEIGHT MAP
END OF FILE
    
```

Figura 3.1: Descripción de un archivo IONEX. En color verde con azul se muestra el encabezado, en amarillo los TEC Map, en verde intenso los RMS Map y en rojo los HEIGHT Map. Tomado de gAGE (2017)

3.2. USTEC

El programa United States Total Electron Content o USTEC, se lanzó como un producto operativo de prueba en noviembre de 2004. Ha sido desarrollado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Geodetic Survey (NGS), el NOAA's Space Environment Center (SEC) y el Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) de la Universidad de Boulder, Colorado (Minter *et al.*, 2007). Actualmente, el SCiESMEX mediante el LANCE y el LACIGE, colaboran y hacen uso de este programa con la finalidad de estudiar el estado de la ionosfera sobre territorio mexicano.

USTEC caracteriza el contenido total de electrones sobre Estados Unidos continental (CONUS, por sus siglas en inglés), en tiempo real con una resolución de 15 minutos, haciendo uso de la red de estaciones GPS del Continuously Operating Reference System (CORS) de NGS. USTEC tiene como base operacional el software llamado MAGIC, creado por Paul Spencer (Araujo-Pradere y Husler, 2007); y utiliza como técnica de asimilación de datos el filtro de Kalman, además de usar como referencia el modelo ionosférico IRI95.

USTEC utiliza los archivos RINEX, descritos en el Capítulo 2; como entrada. De este archivo, los observables GPS se extraen de pseudorángos derivados de las mediciones de código o fase portadora. La dispersión o retraso de tiempo entre señales de dos frecuencias, proporciona una medida del TEC integrado a lo largo de toda la ruta de propagación. La determinación de TEC utilizando observaciones de fase portadora es precisa (reducción de ruido) pero ambigua. Se desconoce el número entero inicial N de ciclos entre el satélite y el receptor, y esta ambigüedad de fase N permanece constante mientras no se produzca la pérdida del bloqueo de la señal. Por otro lado, determinar TEC a partir de observaciones de pseudorango de código es inequívoco pero ruidoso. Utilizando las observaciones de fase portadora muy precisas pero ambiguas, y las observaciones de pseudorango de código inequívocas pero menos precisas, proporcionan la información necesaria para generar los mapas TEC (Araujo-Pradere *et al.*, 2007).

El producto final incluye un mapa del TEC vertical, un mapa de la incertidumbre en el vTEC y un mapa de la diferencia entre el mapa actual y el promedio de 10 días para un Tiempo Universal en particular, como se muestra en la Figura 3.2. Además, se proporcionan archivos ASCII, que incluyen un conjunto de matrices bidimensionales de trayectoria inclinada y vertical del contenido de electrones desde cualquier punto sobre el CONUS hasta los satélites GPS a la vista en ese momento (Fuller-Rowell, 2005).

La validación de USTEC, de acuerdo con la metodología de Araujo-Pradere *et al.* (2007) y de Minter *et al.* (2007), indica una precisión del TEC en la línea de visión de entre 2 y 3 TECU, equivalente a menos de 50 m de retraso de señal en la frecuencia L1.

3.2.1. MAGIC

Como se mencionó antes, MAGIC es la versión de análisis de USTEC, reproduce un modelo en tres dimensiones espaciales y en el tiempo de la densidad de electrones en la ionosfera. A partir

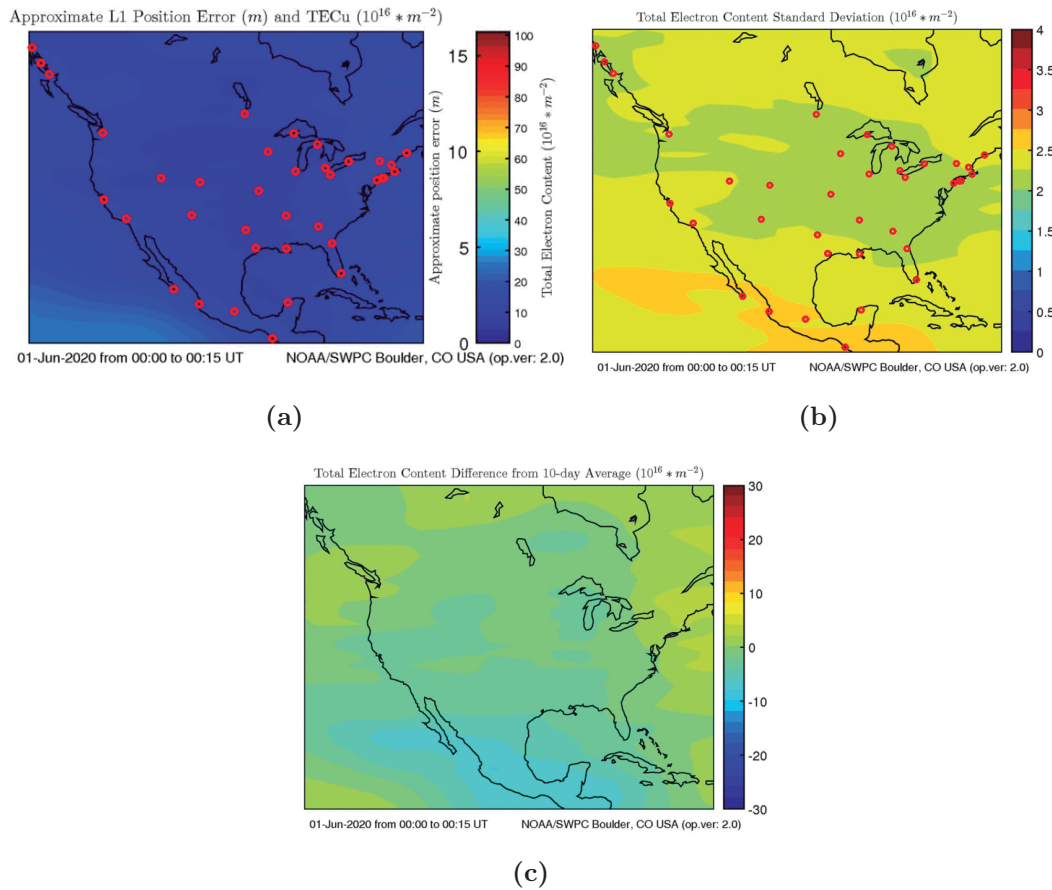


Figura 3.2: Productos de salida de USTEC. a) Mapa de vTEC. b) Mapa de la incertidumbre en el vTEC. c) Mapa de la diferencia de un promedio de 10 días. (Tomadas de <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/USTEC/products/>).

de este modelo se puede obtener el TEC entre dos puntos en cualquier momento. MAGIC usa un filtro de Kalman como algoritmo de asimilación de datos y el modelo IRI de 1995 como modelo de fondo (Minter *et al.*, 2007).

De acuerdo con la descripción en trabajos Araujo-Pradere *et al.* (2007); Araujo-Pradere y Husler (2007); Fuller-Rowell *et al.* (2006); Minter *et al.* (2007); Spencer *et al.* (2004), el modelo MAGIC utiliza un conjunto de funciones ortonormales empíricas (EOFs, por sus siglas en inglés) para caracterizar la variación vertical en la densidad de electrones a través de la ionosfera. En la Figura 3.3 se ilustra un conjunto típico de tres EOFs. Estas funciones ortonormales se calculan para cada conjunto de archivos RINEXobs de un día utilizando un algoritmo de descomposición de valor singular basado en los perfiles de densidad vertical del modelo IRI95. Cabe señalar que, aumentar el número de EOFs más allá de tres solo logra una mejora insignificante en la precisión. El vector de estado en el filtro de Kalman consiste en un conjunto de coeficientes de amplitud para estos EOF, que describe la estructura vertical. Los coeficientes de amplitud se calculan cada 15 min para cada punto dentro de una cuadrícula espacial, con una separación geográfica de 1.5° de latitud y 4.0° de longitud.

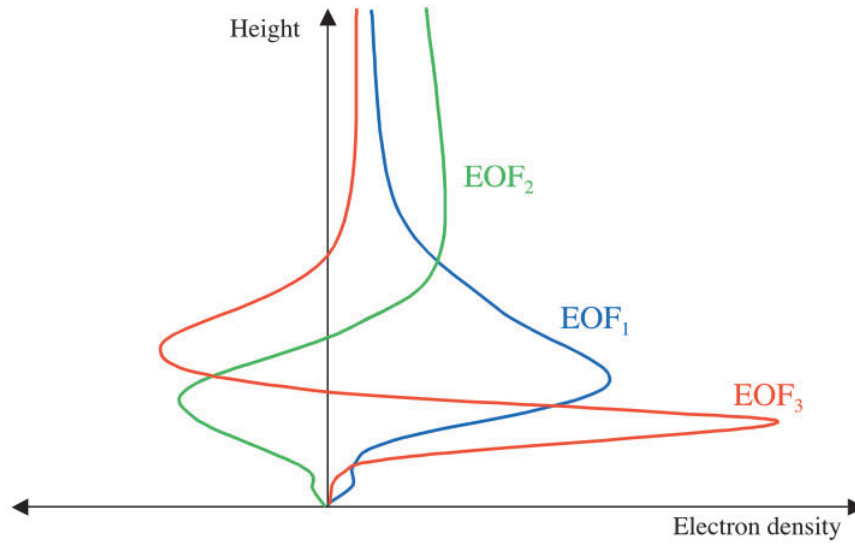


Figura 3.3: Ejemplo de las funciones ortonormales empíricas EOF (Minter *et al.*, 2007)

Spencer *et al.* (2004) especifica que la fase observable, ϕ_i , en la frecuencia i , medida por un receptor GPS, se puede escribir como:

$$\phi_i = \rho/\lambda_i - I/\lambda_i f_i^2 - T/\lambda_i - n_i. \quad (3.1)$$

Los cuatro términos aquí representan la distancia geométrica, ionosfera, troposfera y la ambigüedad entera. Varias combinaciones lineales de las dos frecuencias son útiles en el procesamiento de datos GPS. La combinación libre de geometría¹, $L4$, viene dada por:

$$\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = I(1/f_1^2 - 1/f_2^2) - (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2). \quad (3.2)$$

$L4$ proporciona una estimación del sTEC ionosférico a lo largo de la trayectoria receptor-satélite. Cuando se calibran las observaciones del código P, se obtiene una estimación del sTEC sujeta a sesgos de reloj del satélite/receptor y la multitrayectoria. Dada una estimación del sesgo del reloj del satélite, el sesgo del receptor puede resolverse en el filtro de Kalman. Se supone que con suficientes observaciones, el error en la calibración de la fase ϕ al pseudorange ρ debido a la multitrayectoria es insignificante.

Existen diferencias entre USTEC y MAGIC: USTEC es un sistema operativo en tiempo real y MAGIC en cualquier tiempo, por lo que USTEC analiza datos cada 15 minutos y MAGIC días completos. Además, al ser la versión de análisis, el número de estaciones disponibles para MAGIC es ajustable. De lo contrario, el método de solución para USTEC y MAGIC se basa en las mismas subrutinas: gmagic y gplot (ver Apéndice A). Para la elaboración de este trabajo se usó la versión de MAGIC.

¹Combinación de las frecuencias L1 y L2 que cancela la parte geométrica de la medida, quedando únicamente el efecto de la ionosfera y las constantes instrumentales (multipath y ruido)

3.2.2. Filtro Kalman

El filtro Kalman es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 (Kalman, 1960). El propósito principal del filtro de Kalman es determinar el estado de un sistema (en nuestro caso, de la ionosfera) a partir de mediciones que contienen errores aleatorios. Hay varias fuentes de error en los sistemas de medición ionosférica, y las variaciones de error dependerán del tipo de medición. Por lo tanto, el filtro de Kalman es un algoritmo que minimiza el error de estimación (Goodman, 2006).

Las ecuaciones del filtro de Kalman se pueden formular de varias formas, pero principalmente implica una cantidad considerable de álgebra matricial en su aplicación. En la Figura 3.4 se representan los temas esenciales que forman las bases de la teoría del filtro de Kalman. Para conocer el desarrollo matemático de esta herramienta se puede consultar los trabajos Grewal y Andrews (2014); Spencer *et al.* (2004); Vassiliadis (2007) entre otros.

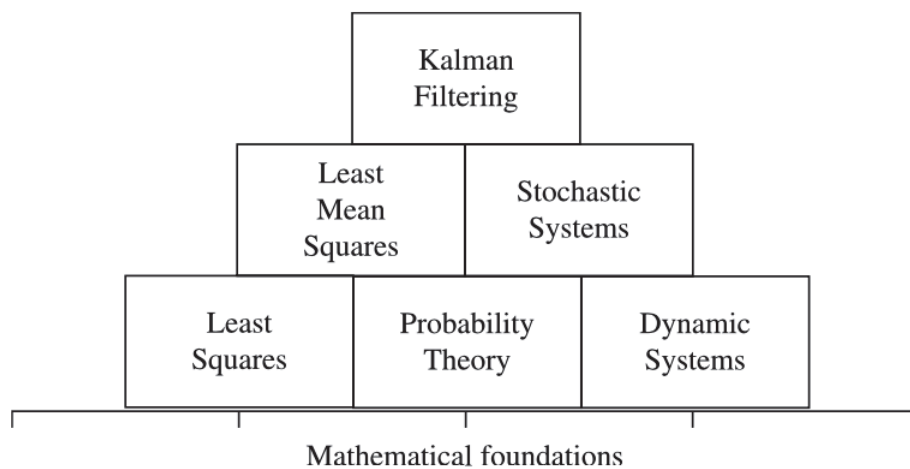


Figura 3.4: Conceptos fundamentales del filtro de Kalman. Tomada de Grewal y Andrews (2014).

3.2.3. Modelo IRI

El desarrollo del proyecto International Reference Ionosphere (IRI) comenzó en 1968 copatrocinado por el Committee on Space Research (COSPAR) y la International Union of Radio Science (URSI) y desde 2014 es reconocido como el estándar oficial para la ionosfera por la Organización Internacional de Normalización (ISO) (Bilitza, 2018).

IRI es un modelo que describe promedios mensuales de densidad electrónica, temperatura de electrones e iones, así como la composición iónica en un intervalo de altitud entre 50 y 2000 km para una ubicación, hora y fecha determinadas (Bilitza, 2018; Cander, 2019). Sin embargo, la limitación de altura a 2000 km es un obstáculo en el uso de IRI para el monitoreo TEC basado en GNSS (Okoh *et al.*, 2018; Teunissen y Montenbruck, 2017). IRI, también proporciona el vTEC ionosférico a partir de 60 km de altura.

El modelo IRI se actualiza periódicamente y ha evolucionado durante varios años como resultado del trabajo de la comunidad científica internacional. La última versión disponible es IRI-2016; [Bilitza *et al.* \(2017\)](#) describe las mejoras al modelo en esta versión. Además, toda la información sobre el modelo se puede encontrar en irimodel.org, incluido el código FORTRAN del modelo, enlaces a aplicaciones de IRI y acceso a una interfaz en línea para calcular los parámetros IRI.

3.3. GPS-TEC por Gopi Krishna Seemala

El software de análisis GPS-TEC fue diseñado por Gopi Seemala del Indian Institute of Geomagnetism. Esta aplicación lee las observables L1, L2, P1 y P2 de los archivos RINEX observacionales para calcular el TEC inclinado (sTEC, por sus sigla en inglés); detecta y elimina deslizamientos de ciclo (cycle slip¹), lee sesgos de satélite de los archivos de código del IGS (los calcula si no están disponibles), calcula el sesgo del receptor y el sesgo entre canales para diferentes satélites en la constelación, y finalmente traza los valores vTEC en la pantalla y escribe archivos de salida ASCII (.CMN para sTEC y .STD para vTEC en el mismo directorio de los archivos de datos. El efecto debido a múltiples trayectorias se elimina utilizando un ángulo de elevación mínimo de 50° ([Ogwala *et al.*, 2019](#)).

De acuerdo con [Seemala y Delay \(2010\)](#) y [Ogwala *et al.* \(2019\)](#), GPS-TEC calcula el vTEC a partir de los valores diarios de sTEC usando la ecuación:

$$vTEC = (sTEC - [b_R + b_S + b_{RX}])/S(E), \quad (3.3)$$

donde b_R , b_S y b_{RX} son el sesgo del receptor, sesgo del satélite y el sesgo entre canales, respectivamente. $S(E)$, corresponde al factor oblicuo, entre el ángulo de elevación, E , respecto al ángulo cenital, z , en el Ionospheric Pierce Point (IPP):

$$S(E) = \frac{1}{\cos(z)} = \left\{ 1 - \left(\frac{R_E \times \cos(E)}{R_E + h_s} \right)^2 \right\}^{-0.5}. \quad (3.4)$$

R_E es el radio medio de la Tierra en kilómetros, y h_s es la altura ionosférica desde la superficie de la Tierra, que es aproximadamente 350 km para la región ecuatorial y de baja latitud.

¹Un cycle-slip es la interrupción en el conteo de ciclos en las mediciones de la fase portadora. En otras palabras, un receptor no puede rastrear la señal del satélite. Una pérdida de energía, una relación señal/ruido muy baja, una falla del software del receptor, un oscilador de satélite que funciona mal pueden causar un cycle-slip. También puede ser causado por condiciones ionosféricas severas. Sin embargo, las más comunes son las obstrucciones, como edificios, árboles, etc., que son tan sólidas que impiden que el receptor rastree la señal del satélite. En tales circunstancias, cuando el satélite reaparece, se reanuda el seguimiento.

En el pos-procesamiento se debe determinar la ubicación y el tamaño de los cycle-slip; luego el conjunto de datos puede repararse con la aplicación de una cantidad fija a todas las observaciones de la fase posterior ([Dutton, 2020](#)).

Como su desarrollador y autor lo menciona en [Seemala \(2011\)](#), este software no garantiza que los valores de TEC sean perfectos, pues su cálculo implica algunos supuestos que pueden comprometer la calidad de los datos; sin embargo, es una herramienta útil para comparar datos de manera general. GPS-TEC puede calcular el TEC por día, mes o año y para el número de estaciones que se requiera. A diferencia de los GIM y de USTEC, este software sólo calcula valores de TEC locales y no genera mapas.

Estudio de casos: análisis y resultados

De acuerdo con el planteamiento de este trabajo, la factibilidad de la tesis se basó en el uso y disponibilidad de datos de GPS. Es por ello que la primer parte del trabajo se enfocó en la búsqueda y recopilación de datos de GPS disponibles y publicados por el SSN y TLALOCNet. En una segunda parte se analizaron las variaciones en la ionosfera durante eventos de tormenta geomagnética usando valores TEC estimados por MAGIC y por GIM. Finalmente, se mostrará una validación de los valores TEC estimados por MAGIC a lo largo del Ciclo Solar 24.

4.1. Búsqueda y Recopilación de datos GPS

En México, se cuenta con varias redes GNSS, principalmente GPS, monitoreadas por distintas instituciones, desde universidades y hasta organizaciones gubernamentales y privadas que tienen como objetivo el estudio de diferentes fenómenos geofísicos y geodésicos por lo que no todas las redes GNSS tienen disponible la información al público en general.

Para este trabajo se utilizaron datos en formato RINEX observacional (RINEXobs) proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) como parte de una colaboración conjunta entre éste y el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE). Cabe aclarar que la distribución y consulta de estos datos no es pública. Además se complementó la información con el repositorio de la Red de Observación y Colaboración Transfronteriza, Terrestre y Atmosférica a Largo Plazo (TLALOCNet) (<http://tlalocnet.udg.mx/>). Los datos de TLALOCNet están disponibles de forma abierta y gratuita a través de los servicios web de UNAVCO (www.unavco.org/).

Es importante mencionar que existe una red combinada entre TLALOCNet y el SSN (SSN-TLALOCNet) que además está vinculada a la red EarthScope Plate Boundary Observatory (PBO) en Norteamérica y a la red Continuously Operating Caribbean GPS Operational Network (COCONet) distribuida en el Caribe, centro y norte de América del Sur (Cabral-Cano *et al.*, 2018). Éstas no son las únicas redes GPS sobre territorio mexicano, existen varias estaciones adicionales que conforman la red Continuously Operating Reference Stations (CORS) y cuyos datos son públicos en Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC). El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y la Administración Federal de Aviación están a cargo de algunas de estas estaciones (NGS-NOAA, 2020).

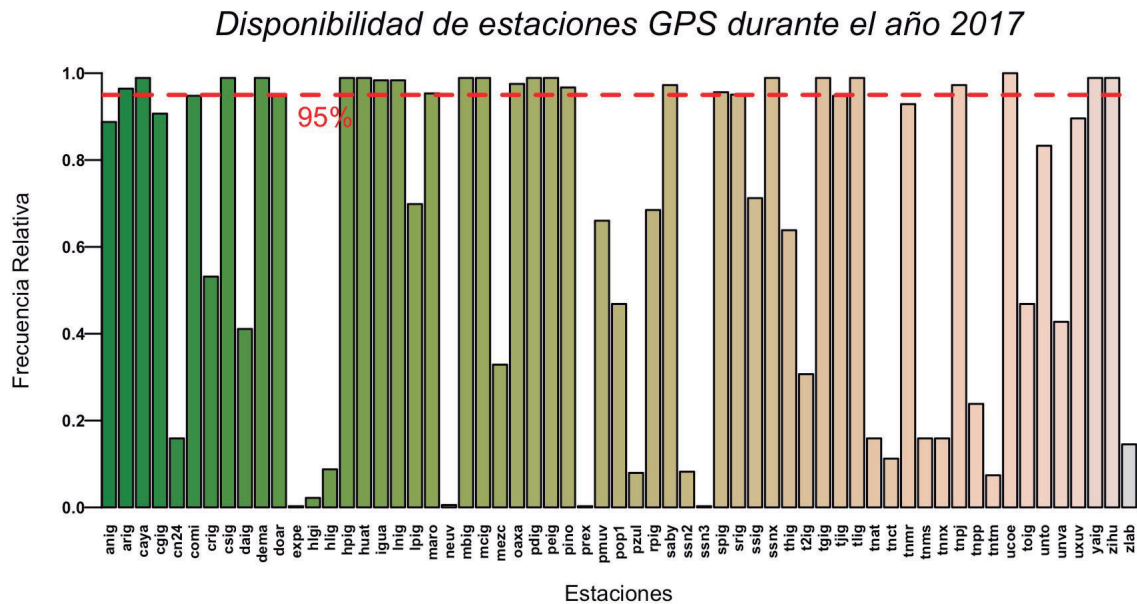


Figura 4.1: Disponibilidad de estaciones durante el año 2017. En la gráfica se muestran aquellas estaciones GPS a cargo del SSN que cuentan con archivos RINEXobs a lo largo de 2017. En el eje y se representa la frecuencia relativa donde 1 es igual a 365 días del año 2017. La línea roja punteada indica un 95 % de disponibilidad de archivos RINEXobs durante el 2017.

El SSN cuenta con alrededor de 60 estaciones GPS y a su vez, la red TLALOCNet consta con más de 70 estaciones GPS con presencia en casi todos los estados del país y en zonas insulares en el Océano Pacífico y el Golfo de México (Cabral-Cano *et al.*, 2018), de las cuales, no todas tienen un registro continuo. Existen varios factores que propician la discontinuidad en la generación de archivos RINEX, entre ellos esta la falta de una conexión a Internet, lejanía de las estaciones GPS, equipos obsoletos, vandalismo de las estaciones GPS e incluso la falta de personal que se encargue del funcionamiento de los equipos GPS.

En la Figura 4.1 se muestran aquellas estaciones a cargo del SSN que tienen un registro cuasi continuo de archivos RINEXobs durante el año 2017 y se señalan aquellas estaciones que cuentan con archivos RINEXobs durante el 95 % del año 2017 y las cuales vamos a utilizar en el desarrollo de este trabajo.

De las 61 estaciones que cuentan con archivos RINEXobs durante 2017, sólo 22 estaciones cuentan con 346 días registrados en archivos RINEX, equivalente al 95 %. Éstas estaciones se muestran en la Figura 4.2 y se enlistan en la Tabla 4.1 junto con sus coordenadas geográficas, las cuales fueron tomadas de la cabecera de los archivos RINEX y/o del portal www.ssn.unam.mx.

Una vez que se estableció con qué estaciones se iba a trabajar, se recopilaron los archivos RINEXobs y fueron procesados a través del software de análisis MAGIC con la metodología descrita en el Apéndice A, obteniendo valores $vTEC$ a lo largo y ancho de México en una malla que abarca de los 35° a los 10° de latitud con una separación de 1° y que en longitud va de

-120° a -85° con una separación de 2° . Cada vértice en la malla corresponde a una ubicación geográfica y se seleccionaron aquellos con las coordenadas más cercanas a cada una de las 22 estaciones para obtener una serie temporal del $vTEC$ para cada estación con una resolución temporal de 15 *minutos*.

Estación	Latitud ($^{\circ}$)	Longitud ($^{\circ}$)	Estación	Latitud ($^{\circ}$)	Longitud ($^{\circ}$)
UCOE	19.8	-101.7	MBIG	32.4	-115.2
HPIG	26.9	-105.7	PDIG	25.0	-105.4
LNIG	24.9	-99.5	CSIG	26.8	-108.4
MCIG	27.9	-101.5	SABY	18.9	-91.2
TGIG	16.8	-93.1	OAXA	17.1	-96.7
PEIG	15.9	-97.1	HUAT	15.8	-96.1
TNPJ	15.7	-93.2	YAIG	18.9	-99.1
DEMA	20.3	-99.0	SSNX	19.3	-99.2
TLIG	17.6	-98.6	ARIG	18.3	-100.3
CAYA	17.0	-100.3	IGUA	18.4	-99.5
PINO	16.4	-98.1	ZIHU	17.6	-101.5

Tabla 4.1: Estaciones GPSs y sus coordenadas geográficas.

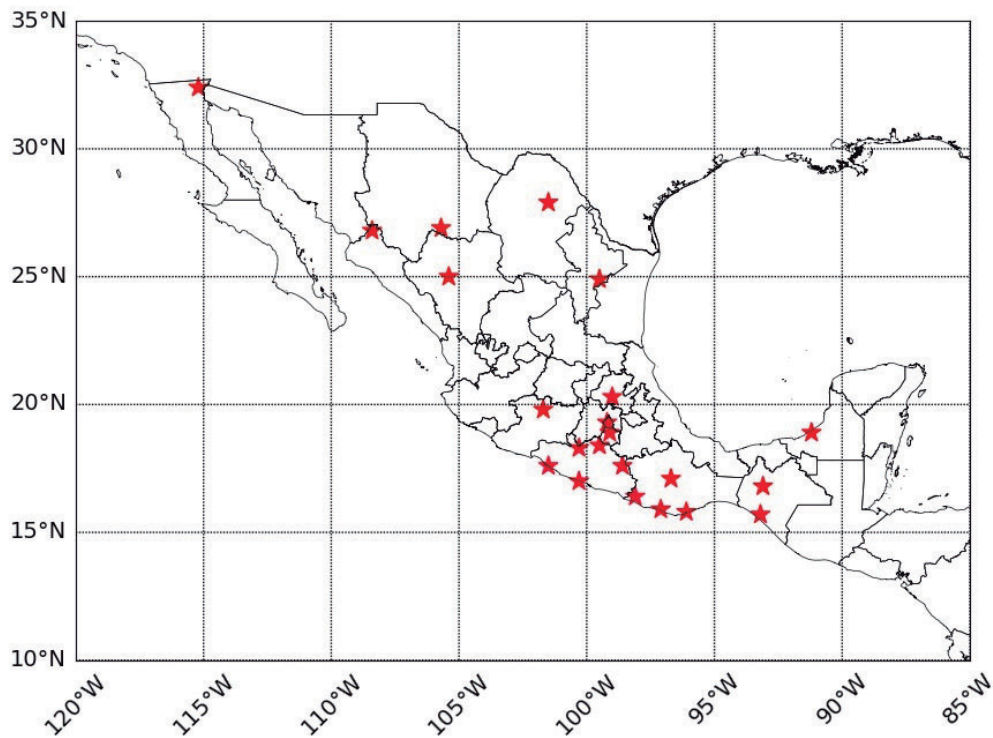


Figura 4.2: Mapa de estaciones GPSs correspondientes a la ubicación presentada en la [Tabla 4.1](#)

Con el objetivo de mostrar una evaluación de la calidad de los datos TEC, en las Figuras 4.3 y 4.4 se muestra un resumen gráfico y numérico de los datos vTEC de cada estación a lo largo de 2017. En las gráficas de lado izquierdo se muestra las series de tiempo de cada estación, en la barra inferior se indica la presencia/ausencia de datos en diferentes colores. En nuestro caso, las barras son de un sólo color (azul) que representa la presencia de datos. Por otro lado, podemos notar que para ninguna estación hay datos faltantes; esto no quiere decir que se cuenta con el registro continuo de archivos RINEXobs, pues como se mencionó anteriormente no es así y más bien se debe a la interpolación que realiza MAGIC por tanto estima valores de TEC a partir de valores con los que se cuenta, logrando así que no falten datos. Sin embargo, la precisión de la estimación depende del número de archivos RINEXobs, como podemos observar en algunas series de tiempo, se presenta una caída en los valores de TEC al final del mes de abril, esto se debe a que durante este periodo sólo se obtuvieron archivos RINEX de una estación (UCOE), con la cual se generó toda la malla. Aquellas estaciones que tienen coordenadas geográficas más cercanas a la estación UCOE no presentan la caída.

Sobre cada serie de tiempo se proporcionan estadísticas generales para cada estación: valor mínimo y máximo, media, mediana, porcentaje de datos faltantes y percentil 95.

Las gráficas de la derecha muestran la distribución de los valores vTEC mediante un histograma, en el eje x se representan los valores vTEC en TECU y en el eje y la frecuencia relativa de los datos a lo largo del año; por ejemplo, para la estación UCOE los valores entre 0 y 5 TECU tienen una frecuencia relativa de 0.03, es decir, el 3% de los valores calculados para esta estación está entre estos valores (ver Figura 4.3, panel superior).

Es importante señalar que este análisis es meramente estadístico y no describe el comportamiento de la ionosfera. Sin embargo nos ayudó a conocer la calidad y tendencia de los datos. De esta manera, podemos relacionar lo observado con la teoría. Por ejemplo, con este análisis obtuvimos que el valor mínimo para todas las estaciones es 0 TECU, pero con base a lo descrito en el Capítulo 2 la densidad electrónica de la ionosfera nunca es cero; debido a que el software de análisis MAGIC se basa en el modelo IRI, el hallazgo de estos valores hizo sospechar de un error en la estimación realizada por este software. Aunado a esto, como se menciona en el apartado US-TEC Technical Document de Araujo-Pradere y Husler (2007), “*los valores de 0 implican que el satélite estaba por debajo del horizonte en ese punto coordinado o que el rayo del satélite pasó fuera de la cuadrícula de latitud y longitud.*” Por otro lado, de acuerdo con Sergeeva *et al.* (2018), dónde se reporta que para el año 2014 (máximo del CS24), las amplitudes del TEC mexicano se ubicaron entre 45 – 75 TECU y un año más tarde, 2015, la amplitud del TEC fue alta pero menor respecto al año 2014 (30 – 65 TECU), y conociendo que el TEC aumenta con la actividad solar y viceversa; se observó que los valores máximos de TEC para 2017 son elevados considerando que este año corresponde a la fase descendente del CS24.

Resumen Estadístico del vTEC sobre México durante 2017

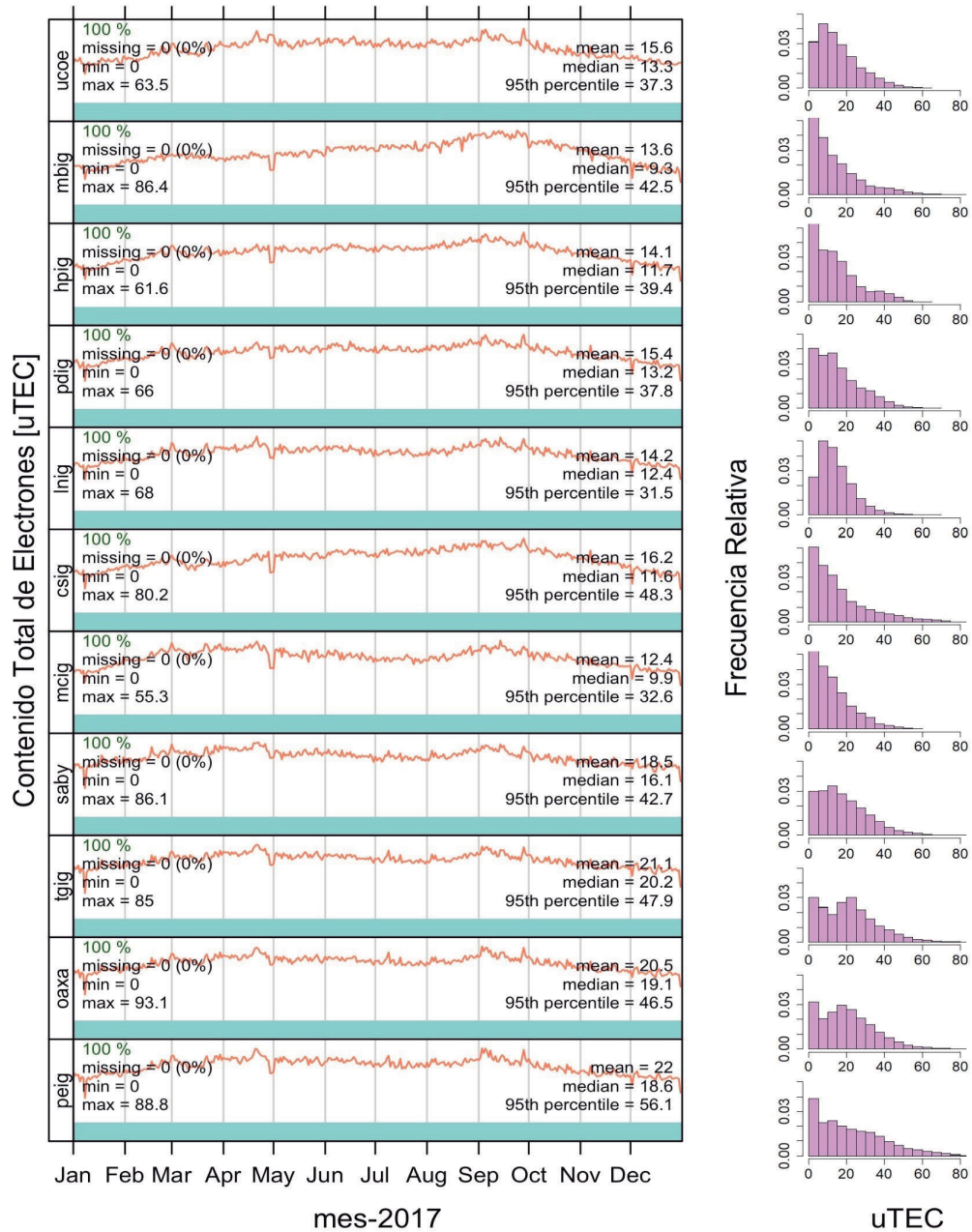


Figura 4.3: Análisis estadístico del vTEC para algunas estaciones GPS sobre México durante 2017. Cada panel representa la serie de tiempo de datos de vTEC para una estación GPS sobre territorio mexicano. Para cada una se proporcionan estadísticas generales: valor mínimo, máximo, media, mediana y percentil 95, así como un histograma que refleja la distribución de valores TEC durante todo el año 2017.

Resumen Estadístico del vTEC sobre México durante 2017

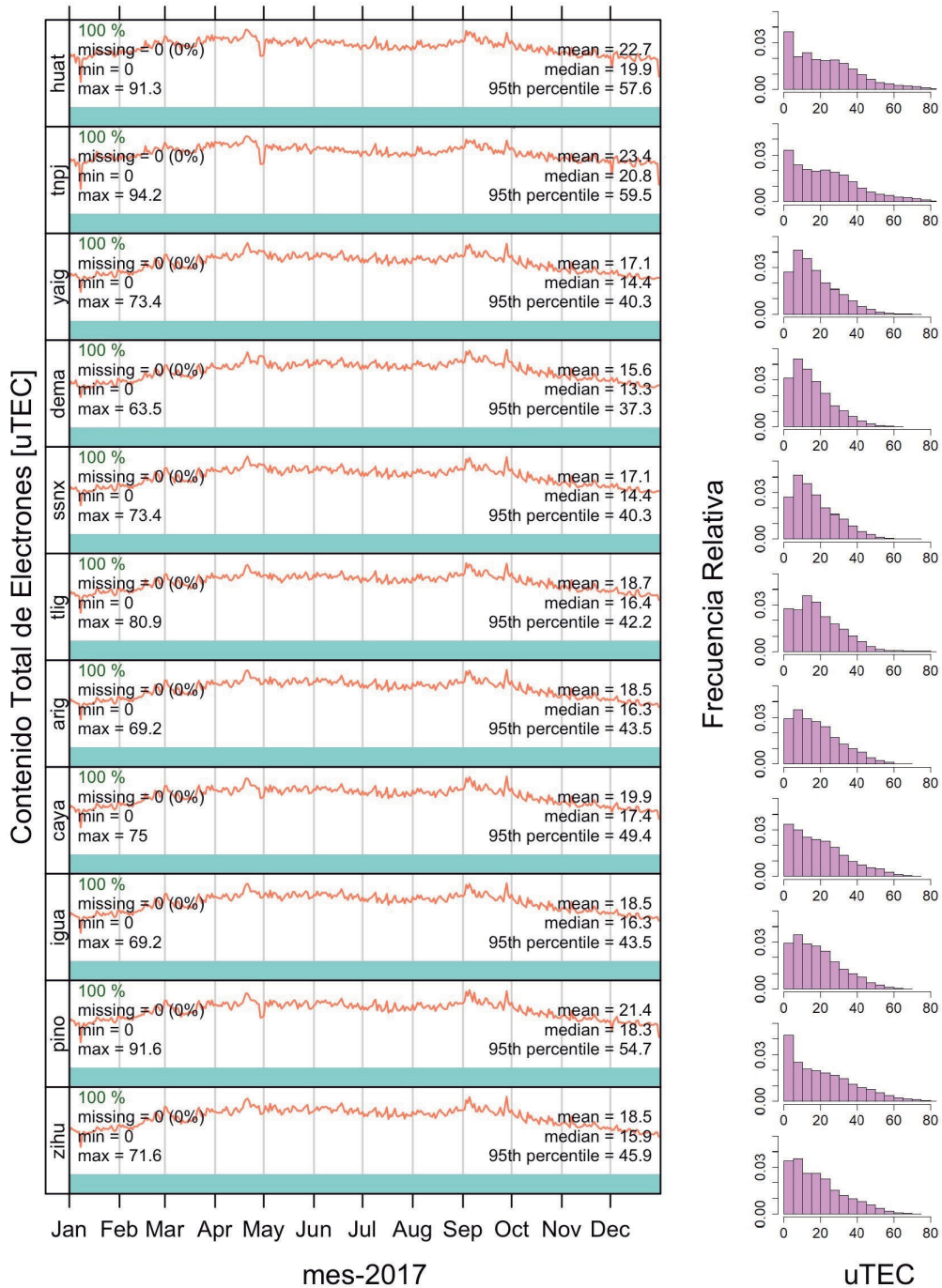


Figura 4.4: Análisis estadístico del vTEC para algunas estaciones GPS sobre México durante 2017. Cada panel representa la serie de tiempo de datos de vTEC para una estación GPS sobre territorio mexicano. Para cada una se proporcionan estadísticas generales: valor mínimo, máximo, media, mediana y percentil 95, así como un histograma que refleja la distribución de valores TEC durante todo el año 2017.

4.2. Comportamiento de TEC sobre México durante tormentas geomagnéticas

En esta parte del trabajo, se estudia la respuesta del TEC ionosférico durante tormentas geomagnéticas de distinta intensidad y categoría haciendo uso de valores v TEC calculados por dos programas con métodos diferentes: MAGIC y GIM; esto con el fin de contribuir a la elaboración de mapas TEC locales y mejorar el rendimiento de modelos ionosféricos sobre México durante eventos de clima espacial.

Para este análisis se usaron dos tipos de datos TEC: 1) TEC derivado de receptores GPS locales estimados con MAGIC (ver Sección 4.1); y 2) TEC extraído de Mapas Ionosféricos Globales (GIM). GIM brindan la oportunidad de validar mapas locales que son producidos por instituciones nacionales con base en diferentes algoritmos y supuestos (Sergeeva *et al.*, 2018). Sin embargo, existen limitaciones, como por ejemplo la disponibilidad retardada, la baja resolución temporal y la falta de estaciones IGS¹ en la región mexicana ya que solo cuenta con la estación INEG localizada en 21.8° *latitud* y -102.3° *longitud*.

Los valores extraídos de GIM se obtuvieron de archivos IONEX disponibles en <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/ionex/> y se usaron los mapas producidos por el Jet Propulsion Laboratory (JPL). Como se vio en el Capítulo 3, distintas instituciones proporcionan mapas globales del contenido de electrones; sin embargo, se decidió ocupar los producidos por JPL debido a que están basados en mapas ionosféricos regionales sobre Estados Unidos y algunos de América del Sur.

Como se mencionó en los Capítulos 1 y 2, las tormentas geomagnéticas, particularmente las intensas, afectan a la ionosfera globalmente y son el fenómeno de clima espacial más importante en el impacto de la telecomunicaciones. Por ello, se identificaron las tormentas geomagnéticas intensas y moderadas ocurridas durante 2017, con el propósito de analizar la relación entre la intensidad de la tormenta geomagnética y la perturbación ionosférica.

Las tormentas geomagnéticas se clasificaron según el valor más bajo del índice Dst publicado por World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>); se identificaron 6 tormentas geomagnéticas moderadas y 2 tormentas geomagnéticas intensas durante el año 2017, enlistadas en la Tabla 4.2. De estas 8 tormentas geomagnéticas identificadas, sólo se estudiarán los efectos sobre la ionosfera de las 2 tormentas geomagnéticas intensas y a modo de comparación se analizarán dos tormentas geomagnéticas moderadas.

En las secciones que siguen se mostrarán casos de estudio relacionados con el tema de investigación. Para cada evento se mostrará: 1) una gráfica del periodo a estudiar que contiene en el panel superior el índice Dst, un panel intermedio con v TEC estimado con MAGIC y un panel

¹El IGS distribuye significativamente el número de estaciones alrededor del mundo para hacer que el marco de referencia esté fácilmente disponible en el reconocimiento del International Terrestrial Reference Frame (ITRF) (Ansari *et al.*, 2017).

inferior con el vTEC estimado con GIM; 2) una gráfica que muestra la perturbación ionosférica correspondiente a cada periodo de tormenta geomagnética.

La perturbación ionosférica asociada a cada tormenta geomagnética se clasificó con base en el índice W , de tal manera que las gráficas correspondientes muestran en un panel superior dos curvas: 1) los valores vTEC observados para una estación en particular y, 2) la mediana a 27 días previos de estos valores. En el panel inferior se graficó el DTEC y se asoció a los valores del índice W .

Evento	Fecha (dd/mm/aa)	Hora (UT)	Dst mínimo (nT) ^a	Categoría
1	01/03/2017	21:00	-61	moderada
2	27/03/2017	14:00	-74	moderada
3	28/05/2017	07:00	-125	intensa
4	16/07/2017	15:00	-72	moderada
5	31/08/2017	11:00	-50	moderada
6	08/09/2017	01:00	-124	intensa
7	28/09/2017	06:00	-55	moderada
8	08/11/2017	01:00	-74	moderada

^aEstos valores corresponden al índice Dst en tiempo real publicados por World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, es decir, son derivados de datos brutos no verificados y pueden contener inexactitudes.

Tabla 4.2: Tormentas Geomagnéticas durante 2017.

4.2.1. Evento del 1o. de marzo 2017

Para este evento de tormenta geomagnética no se tiene registro de fulguraciones o EMC asociadas y de importancia para efectos del clima espacial. Sin embargo, se tiene registro de una corriente de viento solar rápido proveniente de un extenso hoyo coronal (Figura 4.5), así como una componente B_z del campo magnético interplanetario dirigida hacia el sur que propició la reconexión con el campo magnético terrestre y produjo esta tormenta geomagnética. De acuerdo con el índice Dst, la componente horizontal del campo geomagnético alcanzó un valor mínimo de -61 nT durante el primero de marzo de 2017 a las 21:00 horas UT, clasificando esta tormenta como moderada.

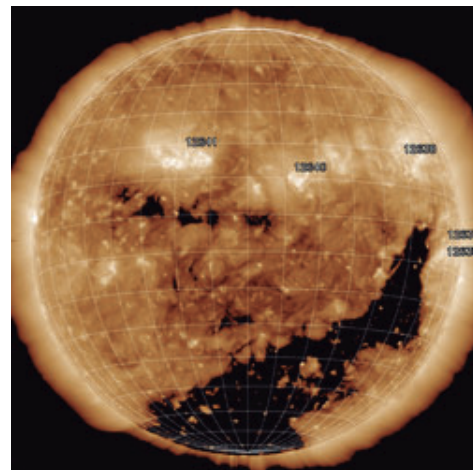


Figura 4.5: El Sol visto en rayos X suaves (193 Å) con el filtro Fe XII, que revela la presencia de un hoyo coronal durante el 1 de marzo de 2017. Obtenida de <https://www.solarmonitor.org/>.

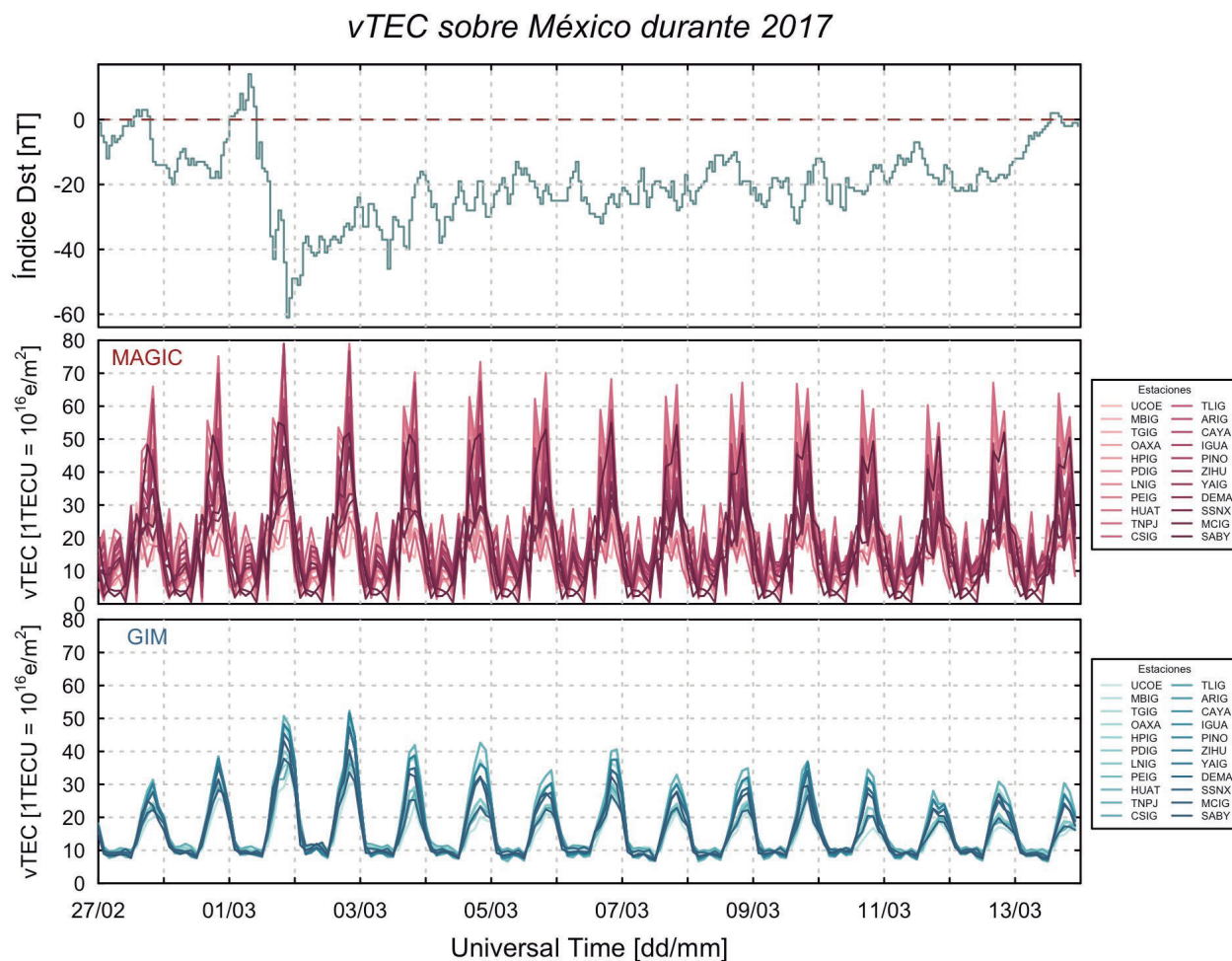


Figura 4.6: Comportamiento del $vTEC$ sobre México durante la tormenta geomagnética de marzo 2017. Panel superior: índice Dst. Panel intermedio: $vTEC$ estimado con MAGIC para 22 estaciones. Panel inferior: $vTEC$ estimado con GIM para 22 estaciones.

La Figura 4.6 corresponde al periodo del 27 de febrero al 13 de marzo de 2017 en la que podemos observar que los valores TEC -MAGIC oscilan entre 1 y $80 \pm 11 TECU$, mientras que los valores TEC -GIM oscilan entre 6 y $50 \pm 7 TECU$. Durante este periodo el máximo diurno se da alrededor de las 20:00 UT con una variación entre 23 y 80 % de MAGIC respecto de GIM¹. Tanto MAGIC como GIM presentan los máximos diurnos más altos el 1 ($51 \pm 5 TECU$ y $41 \pm 5 TECU$, respectivamente) y 2 de marzo ($44 \pm 5 TECU$ y $31 \pm 5 TEU$, respectivamente). Es importante señalar que el valor mínimo del índice Dst se alcanzó aproximadamente a la misma hora del máximo diurno del 1 de marzo, por tanto existe una variación del 37 % de la media mensual calculada por MAGIC² y 56 % de la media mensual calculada por GIM para las 20:00 UT. Por otro lado, durante la fase de recuperación, aunque los valores de MAGIC disminuyeron, conti-

¹Este porcentaje fue calculado mediante: $\% = \frac{MAGIC - GIM}{GIM} \times 100$

²Esta variación se calculó mediante: $\% = \frac{vTEC - \langle vTEC \rangle}{\langle vTEC \rangle} \times 100$, donde $\langle vTEC \rangle$ corresponde al promedio mensual. Los valores $vTEC$ corresponden a los calculados por MAGIC o GIM, según se especifique.

nuaron por encima de la media mensual con una variación entre 10 y 20%; mientras que GIM se mantiene muy cercana a la media mensual e incluso llega a estar por debajo de ésta (-20%).

Respecto al comportamiento de las curvas, notamos que MAGIC describe un doble pico entre las 16:00 UT y las 20:00 UT cuya amplitud varía pico a pico, día con día y es diferente para cada estación, es decir, para algunas estaciones y días el primer pico es mayor al segundo y viceversa. Además, durante las horas nocturnas (2:00-12:00 UT), MAGIC presenta dos picos, el primero a las 6:00 UT y el segundo a las 12:00 UT; mientras GIM se mantiene constante con $10 \pm 2 \text{ TECU}$ durante estas horas.

Para cuantificar la perturbación a la ionosfera sobre la estación UCOE, en la Figura 4.7 observamos que los valores observados para MAGIC durante toda la tormenta geomagnética son mayores a los esperados a 27 días (Figura 4.7(a)) por lo que podemos hablar de una perturbación positiva. Sin embargo, mediante el índice W no podemos clasificar esta perturbación, como se observa en el panel inferior de esta misma figura, se presentan múltiples valores a los que se asocia un $W = +4$ e inmediatamente un $W = -4$ concluyendo que durante este periodo la ionosfera presentó perturbaciones positivas y negativas en todo momento. Por otro lado en la Figura 4.7(b), podemos ver que al igual que para MAGIC, GIM presenta valores esperados menores a los observados y con el índice W confirmamos que hubo una perturbación positiva intensa ($W = +4$) los días 1 y 2 de marzo, durante la fase inicial y principal de la tormenta geomagnética.

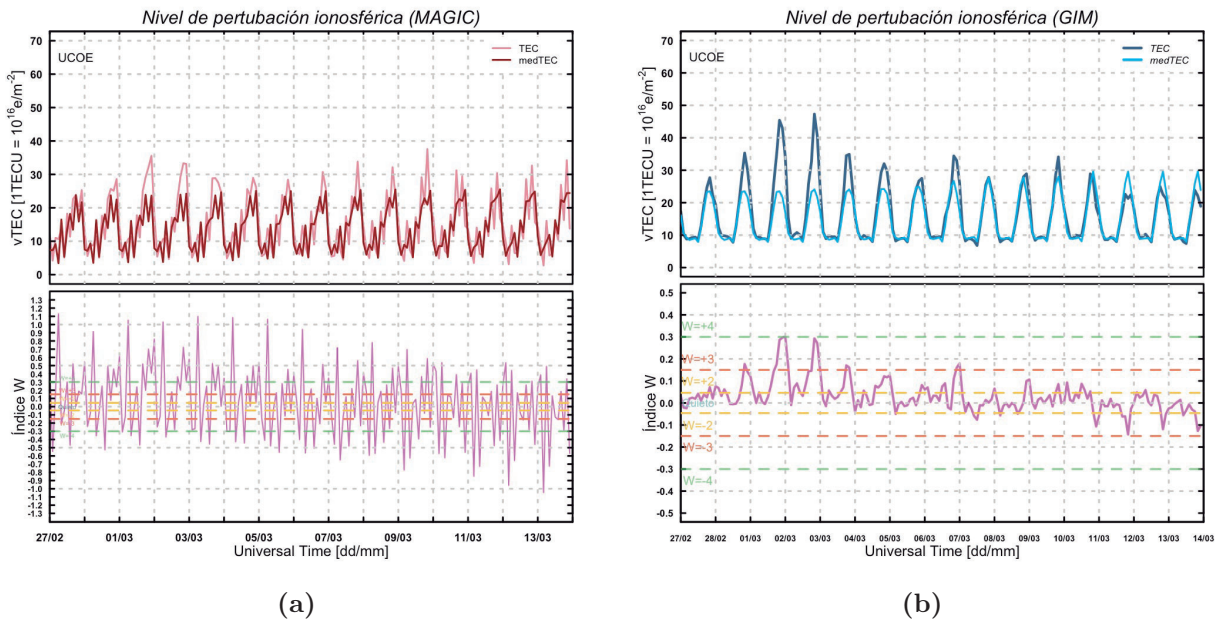


Figura 4.7: Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de marzo 2017. a) Perturbación ionosférica determinada con MAGIC. b) Perturbación ionosférica determinada con GIM. (Panel superior: se presenta los valores vTEC observados y la mediana a 27 días de los mismos. Panel inferior: índice W.)

4.2.2. Evento 28 de mayo 2017

Durante los últimos días del mes de mayo de 2017 se presentó una tormenta geomagnética que de acuerdo con el índice Dst fue de categoría intensa. El índice Dst alcanzó un mínimo de $125 nT$ aproximadamente a las 7:00 UT del 28 de mayo. Esta tormenta fue propiciada por una EMC dirigida hacia la Tierra (identificada por LASCO el 23 de mayo), y su onda de choque llegó a la Tierra el 27 de mayo, aproximadamente a las 15:00 UT provocando un SSC.

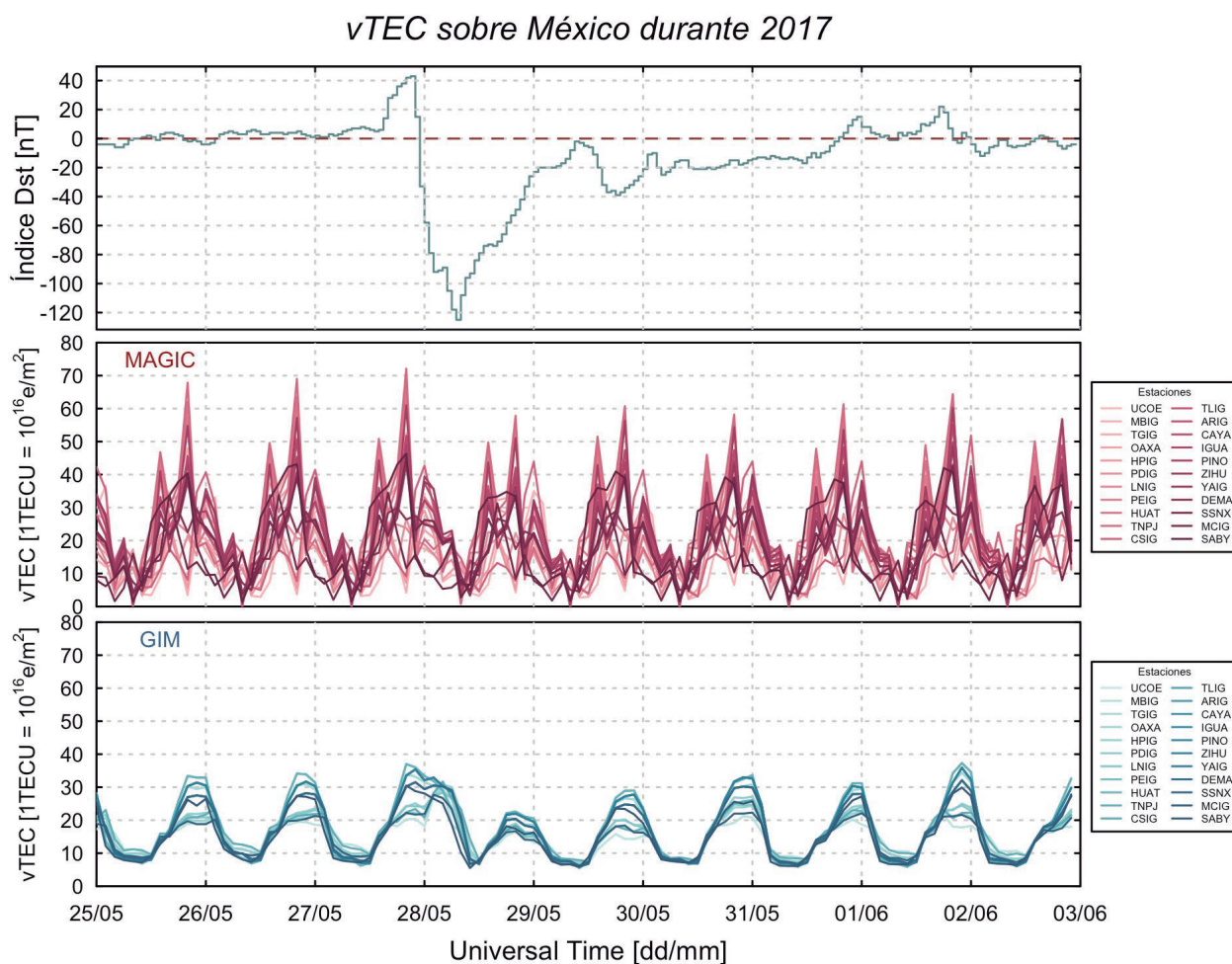


Figura 4.8: Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de mayo 2017. Panel superior: índice Dst. Panel intermedio: vTEC estimado con MAGIC para 22 estaciones. Panel inferior: vTEC estimado con GIM para 22 estaciones.

En la Figura 4.8 se presenta el comportamiento del índice Dst y el vTEC en el periodo que comprende del 25 de mayo al 3 de junio de 2017; en el que se desarrolló esta tormenta geomagnética. MAGIC estima valores de vTEC entre 0 y $\sim 70 \pm 3 TECU$, mientras que GIM registra valores entre 5 y $\sim 38 \pm 2 TECU$. A lo largo de este periodo, MAGIC registró los valores más altos del día durante las 14:00 y las 0:00 UT, con el máximo diurno a las 20:00 UT. Por su parte, GIM mostró los valores más altos del día entre las 18:00 y las 2:00 UT con su

máximo a las 22:00 UT. Particularmente, la media mensual estimada con MAGIC presenta su máximo diurno a las 22:00 UT. La mayor variación entre los cálculos de MAGIC respecto de GIM se da entre las 12:00 y 20:00 UT (30 – 100 %).

Para GIM se observa que hay cambios en la curva de $v\text{TEC}$ a partir del SSC de esta tormenta geomagnética y prevalecen valores altos de $v\text{TEC}$ durante varias horas desde las 14:00 UT del 27 de mayo hasta las 8:00 UT del 28 de mayo, aproximadamente, hasta el comienzo de la fase de recuperación; aunado a esto, observamos un doble pico en el máximo diurno. Específicamente, el 28 de mayo a las 4:00, 6:00 y 8:00 UT hubo incremento de $v\text{TEC}$ respecto a la media mensual de 150 %, 158 % y 95 %, respectivamente; posteriormente entre las 12:00 UT del 28 de mayo y las 12:00 UT del 29 de mayo se observa una disminución en los valores $v\text{TEC}$ entre el 14 % y 31 %; siendo el 28 y 29 de mayo los días que la ionosfera sufrió variaciones importantes.

Por otro lado, aunque MAGIC también presenta variaciones respecto a la media mensual durante el 27, 28 y 29 de mayo, éstas no son tan grandes y constantes como las que muestra GIM, pues el mayor incremento que alcanza es de 76 % a las 4:00 UT del 28 de mayo y a las 20:00 UT del mismo día hay un decremento de -48 %.

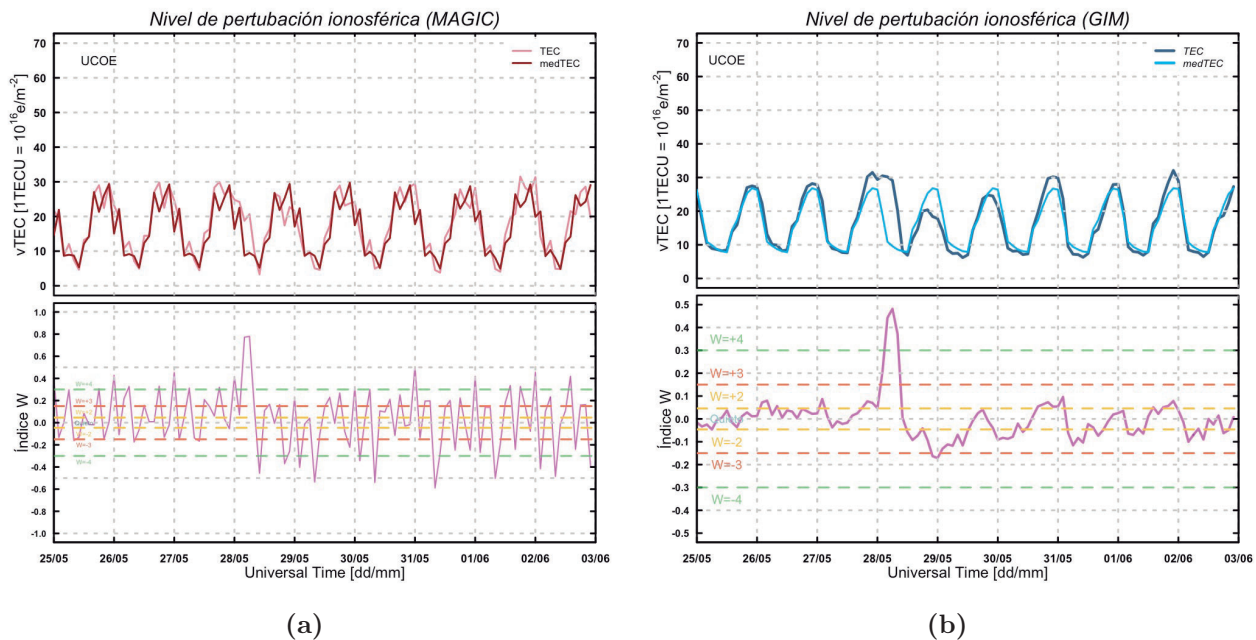


Figura 4.9: Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de mayo 2017. a) Perturbación ionosférica determinada con MAGIC. b) Perturbación ionosférica determinada con GIM. (Panel superior: se presenta los valores $v\text{TEC}$ observados y la mediana a 27 días de los mismos. Panel inferior: índice W.)

En la Figura 4.9, se presenta el análisis de la perturbación ionosférica sobre la estación UCOE. Por una parte, el $v\text{TEC}$ -MAGIC observado es muy cercano al medTEC (Figura 4.9(a)); sin embargo, durante el 27 de mayo se percibe que el máximo diurno duró algunas horas más y por ello en la gráfica del índice W se observa un DTEC de ~ 0.8 , indicando que durante las primeras horas del 28 de mayo hubo una perturbación ionosférica positiva intensa ($W = +4$)

que afectó a territorio mexicano.

Para el caso de los valores estimados con GIM (Figura 4.9(b)), se observan dos comportamientos importantes: 1) un enriquecimiento en los valores observados sobre los esperados durante 27-28 de mayo y 2) una disminución de los observados respecto a los esperados durante el 28-29 de mayo. Por lo tanto, al igual que con MAGIC, se puede identificar la perturbación ionosférica positiva intensa ($W = +4$) y además una perturbación ionosférica negativa moderada ($W = -3$) durante las últimas horas del 28 de mayo.

4.2.3. Evento 8 de Septiembre 2017

Este evento ha sido extensamente estudiado debido a que ocurrió después de una fulguración X9.3, la más intensa durante el Ciclo Solar 24; este tipo de evento es sumamente importante para comprender los impactos sobre la ionosfera y cualquier otro impacto que surja de los eventos del clima espacial, (Bagiya *et al.*, 2018; Blagoveshchenskii y Sergeeva, 2019; Imtiaz *et al.*, 2020; Yasyukevich *et al.*, 2018).

Gonzalez-Esparza *et al.* (2018), describe los impactos de los eventos de clima espacial sobre la región mexicana durante septiembre de 2017 y la situación crítica de protección civil que se presentó en México en este mismo periodo al ocurrir un huracán categoría 2 en el Golfo de México y dos sismos de gran magnitud sobre el territorio. En dicho artículo se presentan las perturbaciones a la ionosfera y se concluye que los efectos del clima espacial (tormentas geomagnéticas y fulguraciones) dominaron el comportamiento del TEC.

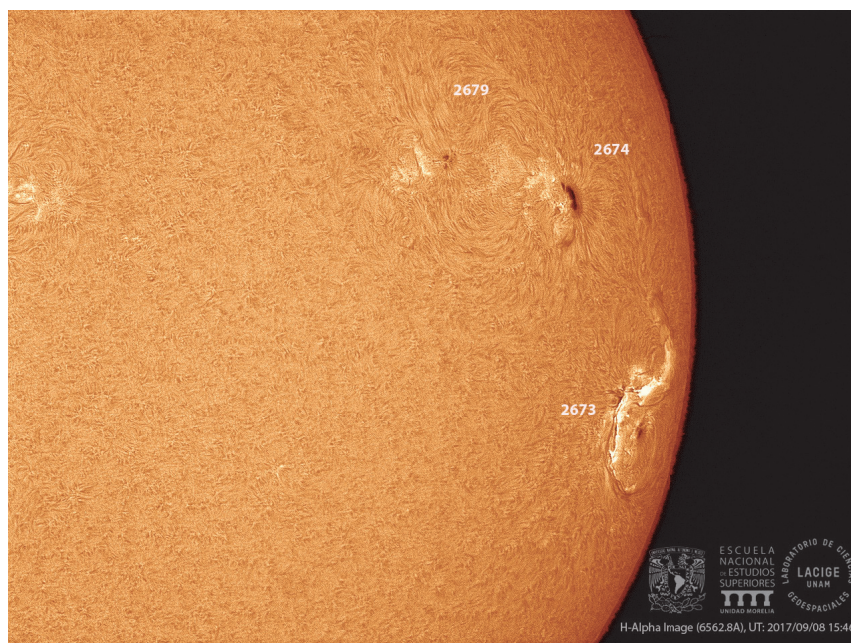


Figura 4.10: Imagen solar H-Alpha (6562.8Å) obtenida el 8 de septiembre de 2017 a las 15:46 UT. La imagen muestra la cromosfera solar y las regiones activas 2673, 2674 y 2679. Imagen del Laboratorio de Ciencias Geoespaciales.

De acuerdo con el catálogo de EMC de LASCO (Gopalswamy, 2005), y el catálogo de fulguraciones solares Hinode Flare Catalogue (Watanabe *et al.*, 2012), el mes de septiembre del año 2017 tuvo alrededor de 200 eventos solares de distinta magnitud, de los cuales algunos provocaron perturbaciones al campo magnético terrestre generando la tormenta geomagnética del 8 de septiembre (ver figura 4.10).

Acorde al índice Dst publicado por World Data Center for Geomagnetism, Kyoto; el 8 de septiembre 2017 a las 01:00 UT, el índice Dst alcanzó un mínimo de $-124 nT$, categorizando esta tormenta geomagnética como intensa. Para este evento se analizó un periodo de 10 días a partir del 5 de septiembre y hasta el día 15 del mismo mes. Durante este periodo el Sol emitió 4 fulguraciones de clasificación X . El 6 de septiembre tuvieron lugar dos fulguraciones: $X2.2$ y $X9.3$ a las 08:57 y 11:53 UT, respectivamente. La segunda fulguración estuvo acompañada por una emisión de radio solar (Yasyukevich *et al.*, 2018). Durante el 7 de septiembre a las 14:20 UT fue eyectada una fulguración $X1.3$ y el 10 de septiembre a las 15:35 UT una fulguración $X8.2$. A lo largo de este periodo también hubo fulguraciones de categoría M muy intensas que contribuyeron a los efectos en el campo geomagnético. Por otro lado, fueron expulsadas tres EMC tipo Halo (dirigidas hacia a la Tierra) que repercutieron en el campo geomagnético durante este periodo. Con la fulguración $X9.3$ del 6 de septiembre se asocia la segunda EMC a las 12:24 UT con una velocidad de $1571 km/s$, la cual generó el pequeño incremento en el índice DST durante el 8 de septiembre. La tercera EMC identificada en este periodo fue la más rápida con una velocidad de $3163 km/s$ eyectada el 10 de septiembre a las 16:00 UT; sin embargo las afectaciones al campo geomagnético fueron de baja intensidad.

En la Figura 4.11 se presenta el comportamiento del índice Dst y el vTEC en el periodo antes mencionado; MAGIC estima valores de vTEC entre 2 y $\sim 65 \pm 4 TECU$, mientras que GIM registra valores entre 5 y $\sim 50 \pm 3 TECU$. MAGIC presenta un pico doble en el máximo diurno: el primero a las 18:00 UT y el segundo a las 20:00 UT; mientras que GIM alcanza el máximo diurno entre las 20:00 y las 22:00 UT.

Tanto MAGIC como GIM calcularon un aumento en el TEC respecto a su media mensual durante las horas cercanas al máximo diurno, los días 5 y 6 de septiembre antes del comienzo de la tormenta geomagnética, así como el 14 de septiembre cuando una tormenta geomagnética de categoría débil se presentó.

Durante la fase principal de la tormenta geomagnética, en el vTEC calculado por GIM se muestra un enriquecimiento desde el 7 de septiembre a las 20:00 UT hasta el 8 de septiembre a las 6:00 UT, teniendo la mayor variación a las 4:00 UT con 147% respecto de la media mensual. Por otro lado, con MAGIC también se puede observar este enriquecimiento (55% 8 de septiembre 4:00 UT); sin embargo, las variaciones son más pequeñas que con GIM, reflejando una diferencia de -18% entre los dos cálculos.

Algo importante que resaltar durante este evento, es que también se presentó una diferencia de TEC entre estaciones para el 8 de septiembre, es decir, las estaciones más al norte del país obtuvieron valores TEC más bajos que las estaciones hacia el centro de México (puede consultar la Figura C.3).

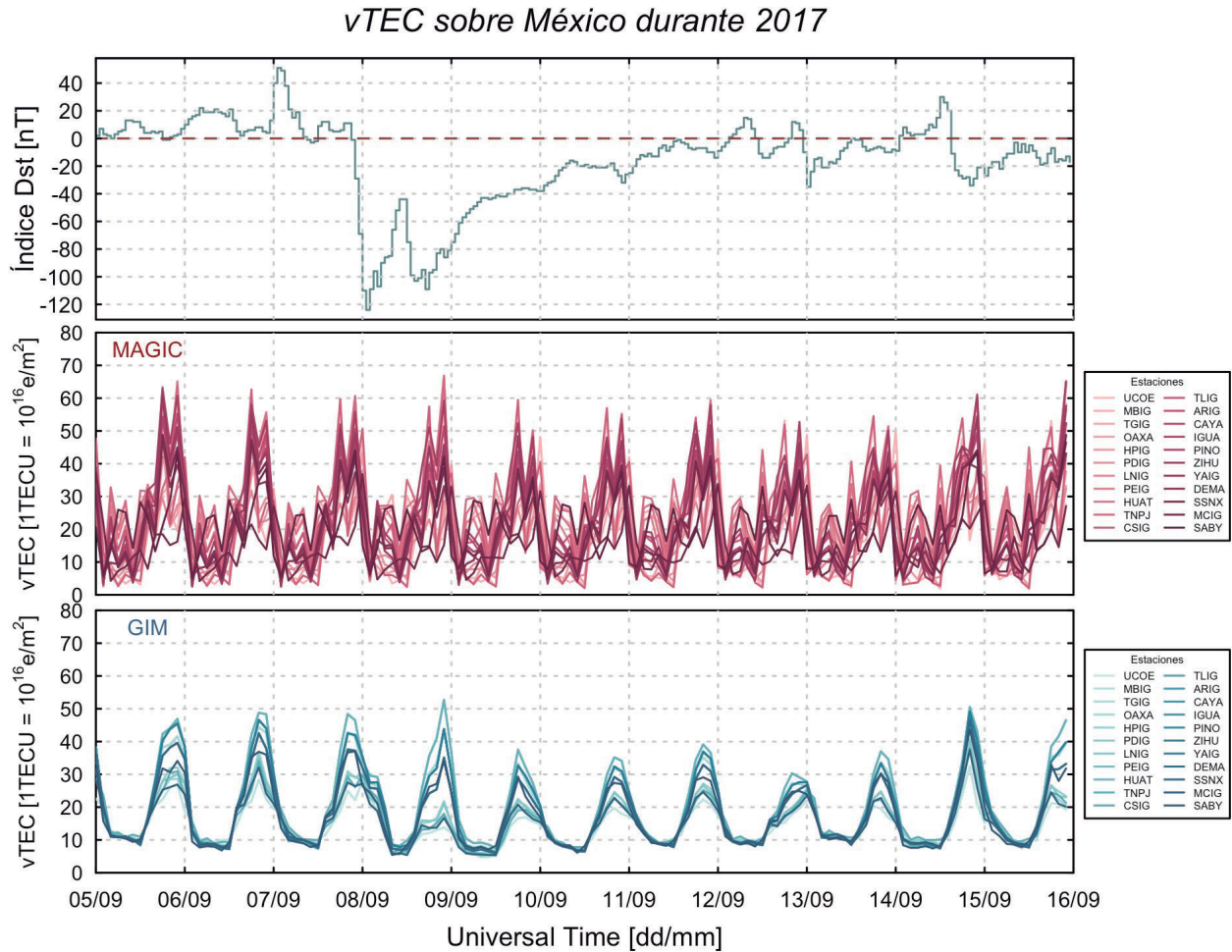


Figura 4.11: Comportamiento del $vTEC$ sobre México durante la tormenta geomagnética de septiembre 2017. Panel superior: índice Dst. Panel intermedio: $vTEC$ estimado con MAGIC para 22 estaciones. Panel inferior: $vTEC$ estimado con GIM para 22 estaciones.

En la Figura 4.12, se muestran las curvas de $vTEC$ correspondientes a la estación UCOE. En general, tanto para MAGIC como para GIM se observa un enriquecimiento del $vTEC$ durante el 5, 6, 7 y 14 de septiembre, reflejando una perturbación ionosférica positiva intensa ($W = +4$) durante las primeras horas del 8 de septiembre cuando el índice Dst alcanzó su mínimo valor. Además, con los valores $vTEC$ -GIM se percibe con mayor precisión, perturbaciones positivas moderadas ($W = +3$) durante el 5, 6, 13 y 14 de septiembre y algunas perturbaciones negativas moderadas ($W = -3$) el 9 y 14 de septiembre.

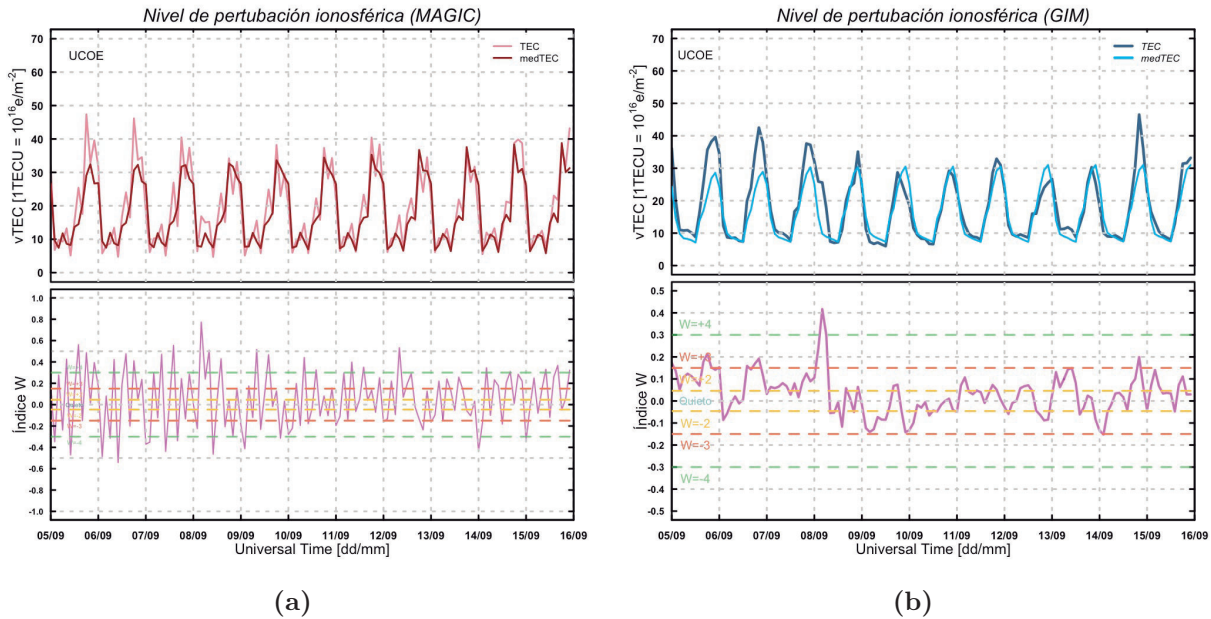


Figura 4.12: Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de septiembre 2017. a) Perturbación ionosférica determinada con MAGIC. b) Perturbación ionosférica determinada con GIM. (Panel superior: se presenta los valores $vTEC$ observados y la mediana a 27 días de los mismos. Panel inferior: índice W .)

4.2.4. Evento 8 de Noviembre 2017

Con base en el índice Dst , el 7 de noviembre comenzó una tormenta geomagnética que alcanzó un mínimo de $-74nT$ (tormenta moderada), el 8 de noviembre a la 01:00 UT y tuvo una duración de aproximadamente de 3 días, por lo que para este evento se tomó un período de 7 días, desde el 5 de noviembre y hasta el 11 de noviembre. Durante este período no se registran EMCs dirigidas hacia la Tierra ni fulguraciones de magnitud importante. Sin embargo, se registró una corriente de viento solar rápido proveniente del hoyo coronal 26640 que muy probablemente generó esta TG (Hernández-Anaya, 2018).

En la Figura 4.13 se muestra el índice Dst y las estimaciones de $vTEC$ de las 22 estaciones durante este periodo de tormenta geomagnética. Aquí podemos ver que los valores de TEC -MAGIC oscilan entre 1 y $55 \pm 3 TECU$ y TEC -GIM entre 4 y $42 \pm 2 TECU$, con ambos programas el máximo diurno se presenta a las 18:00 UT. Cabe resaltar, que MAGIC continua teniendo el patrón de doble pico en el máximo del día, mientras que para GIM es el primer evento en el que se observa este patrón y coincide con el SSC y la fase principal de la tormenta geomagnética.

A lo largo de este periodo los valores calculados por MAGIC y GIM estuvieron por debajo de la media mensual correspondiente a cada programa. Sin embargo, hay un enriquecimiento de $vTEC$ que coincide con la fase principal de la tormenta geomagnética. GIM presentó este enriquecimiento entre las 14:00 UT del 7 de noviembre y las 10:00 UT del día 8 del mismo mes,

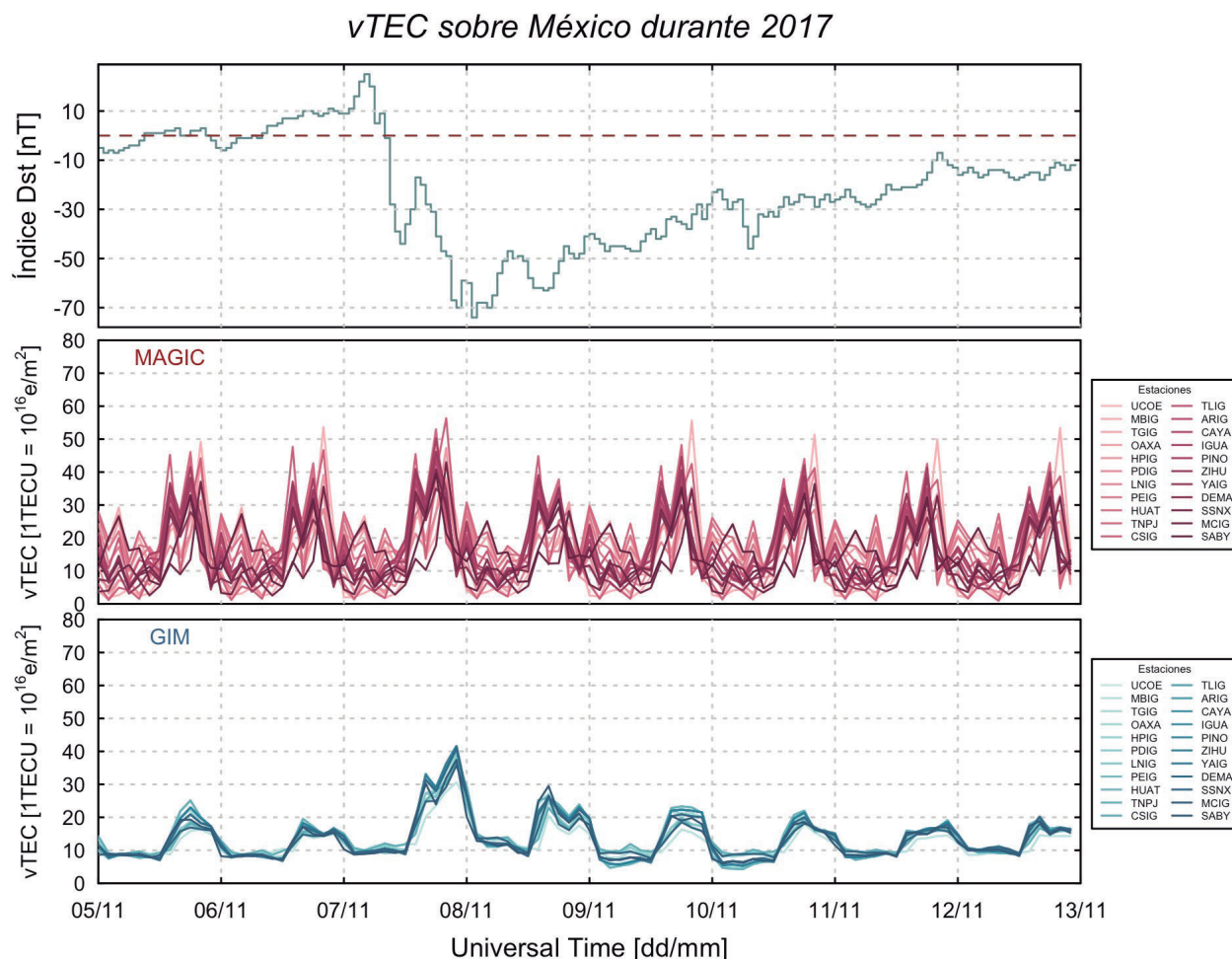


Figura 4.13: Comportamiento del vTEC sobre México durante la tormenta geomagnética de noviembre 2017. Panel superior: índice Dst. Panel intermedio: vTEC estimado con MAGIC para 22 estaciones. Panel inferior: vTEC estimado con GIM para 22 estaciones.

mientras que MAGIC desde las 12:00 UT del día 7 hasta el 8 de noviembre a las 10:00 UT, aunque cabe mencionar que este aumento no es continuo para todas las horas como en el caso de GIM. GIM alcanzó su valor máximo ($38 \pm 4 \text{ TECU}$, con una diferencia de 123% de su media mensual) a las 22:00 UT del 7 de noviembre, mientras que MAGIC alcanzó un máximo de $40 \pm 3 \text{ TECU}$ a las 20:00 UT del mismo día con una diferencia de 103% respecto de su media mensual.

Al analizar los valores TEC observados respecto a los esperados (mediana a 27 días), Figura 4.14, podemos ver que para MAGIC (Figura 4.14(a)) los valores observados son muy cercanos a los esperados, a excepción de día 7 de noviembre en el que se presenta una ligera sobrestimación de los valores observados. En el gráfico correspondiente al índice W no podemos distinguir puntualmente una perturbación ionosférica ya que se aprecian múltiples valores que coinciden con $W = \pm 4$ denotando que la ionosfera no tuvo un estado tranquilo durante esta alteración del campo magnético terrestre.

Por otro lado, los valores TEC-GIM (Figura 4.14(b)) observados estuvieron por debajo de los valores medTEC salvo los días 7 y 8 de noviembre donde se observa un enriquecimiento de TEC que provocaron una perturbación ionosférica positiva moderada ($W = +3$) durante estos días.

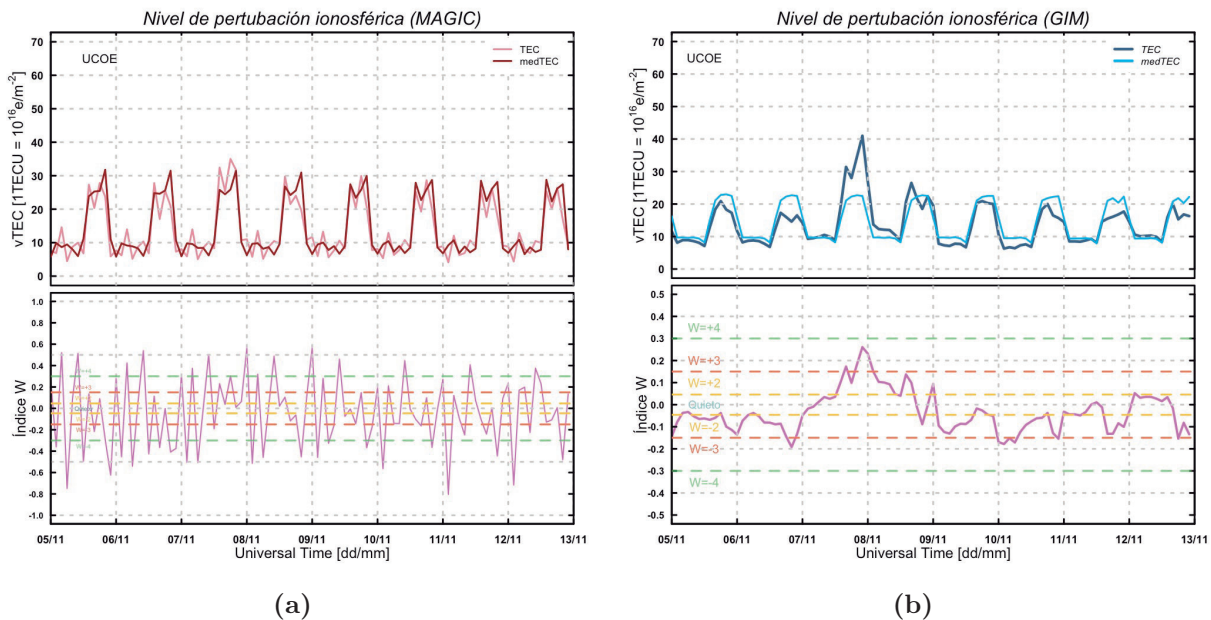


Figura 4.14: Perturbación ionosférica durante la tormenta geomagnética de noviembre 2017. a) Perturbación ionosférica determinada con MAGIC. b) Perturbación ionosférica determinada con GIM. (Panel superior: se presenta los valores $vTEC$ observados y la mediana a 27 días de los mismos. Panel inferior: índice W .)

4.3. Validación de valores $vTEC$ estimados con MAGIC

Con base en la discrepancia que presentan los valores $vTEC$ de GIM y de MAGIC entre sí, se decidió realizar una serie de pruebas para validar las estimaciones realizadas por MAGIC, las cuales contemplan: la comparación con otro código, la calidad de los archivos RINEXobs, el número de estaciones, así como la resolución temporal y espacial.

4.3.1. Calidad de los archivos RINEXobs

Inicialmente, se consideró que la calidad de los archivos RINEXobs era mala, es decir, que no contaban con el formato adecuado para que MAGIC pudiera utilizarlos. Esto incluye desde el orden de las observaciones y hasta el número de *cycle-slip* que pudiera tener el archivo. Para descartar esta posibilidad, se hizo uso de programas como *teqc* y *GIPSY* (ver Apéndice B), principalmente de uso geodésico, para dar el formato adecuado a los archivos RINEXobs pero sobre todo para corroborar la calidad de estos, es decir, para identificar el número de *cycle-slip* en cada archivo, así como colocar las observaciones en el orden: L1, L2, P1 y P2. Como prueba

adicional nos cercioramos que el orden de las observaciones no repercutiera en los resultados, teniendo como conclusión que el orden las observaciones no influye en el funcionamiento de MAGIC, ya que identifica perfectamente los datos que necesita procesar. Respecto a los *cycle-slip*, el programa MAGIC los detecta para cada actualización en el filtro Kalman; sin embargo, la documentación de éste código no menciona el procedimiento que utiliza para manejar los *cycle-slip*.

4.3.2. Comparación entre códigos

Una vez que nos aseguramos que el formato de los archivos RINEXobs tampoco influía en el funcionamiento de MAGIC y/o que se encontraban en el formato adecuado, se realizó una primer prueba, que consistió en comparar dos códigos en condiciones actuales: GPS-TEC y MAGIC, debido a que generan valores localmente; por lo que se tomó el último archivo RINEXobs disponible para la estación UCOE en TLALOCNet. Este archivo corresponde al día *11 de noviembre de 2019*. Se tomó énfasis en la comparación a las 6:00 UT y a las 20:00 UT (00:00 LT, y 14:00 LT Ciudad de México), los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Si observamos la Figura 4.15(i), GPS-TEC calculó $12 \pm 4 \text{ TECU}$ para las 20:00 UT, mientras que MAGIC, calculó para la misma hora, $81 \pm 27 \text{ TECU}$, por lo que existe un incremento de 561 % de MAGIC respecto a GPS-TEC. Debido a la diferencia tan grande entre los valores TECU calculados por ambos programas se prosiguió a realizar otra prueba que consistió en comparar los valores calculados por ambos programas en distintas épocas del Ciclo Solar 24: fase ascendente (2011), máximo solar (2014) y fase descendente (2017).

En la Figura 4.15 se presenta una gráfica del progreso del CS24 señalando el año correspondiente a cada fase del ciclo, el índice Dst que muestra el estado del campo geomagnético durante el día estudiado y la estimación de vTEC por GPS-TEC y MAGIC. En este análisis notaremos que en 2011 y 2014 (Figuras 4.15(f),4.15(g)), la estimación realizada por ambos programas a las 20:00 UT es muy cercana, existe una diferencia del 1 % y 14 %, respectivamente. Mientras que para las 06:00 UT de estos años existe una variación de 186 % y 275 % de MAGIC respecto de GPS-TEC. Durante 2017 la mayor variación entre MAGIC y GPS-TEC se da a las 20:00 UT con 188 %; a las 06:00 UT es de 27 %, con $4 \pm 9 \text{ TECU}$ de MAGIC y $3 \pm 2 \text{ TECU}$ de GPS-TEC (Figura 4.15(h)). Para el año 2019 (Figura 4.15(i)) se presentaron las variaciones más altas con 335 % a las 6:00 UT y 561 % a las 20:00 UT.

Con base en estas primeras pruebas, se decidió analizar la misma fecha para el resto de los años que conforman el CS24, que abarca desde 2008 y que hasta el 2019 no ha terminado. Sin embargo, en la base de datos de TLALOCNet sólo encontramos archivos disponibles de la estación UCOE del año 2010 a 2019. Además, se agregó la comparación con los valores estimados por GIM. Es así como en la Figura 4.16 podemos ver en años como 2010, 2011 y 2013 los cálculos realizados con MAGIC y GIM son muy cercanos entre sí y están por debajo de los valores calculados por GIM. En años como 2012 y 2014 MAGIC y GIM presentan valores vTEC semejantes y mayores que los de GPS-TEC. Durante 2015, las tres estimaciones se ajustan tanto en el mínimo como en el máximo diurno. Y aunque para 2016 y 2017, MAGIC y

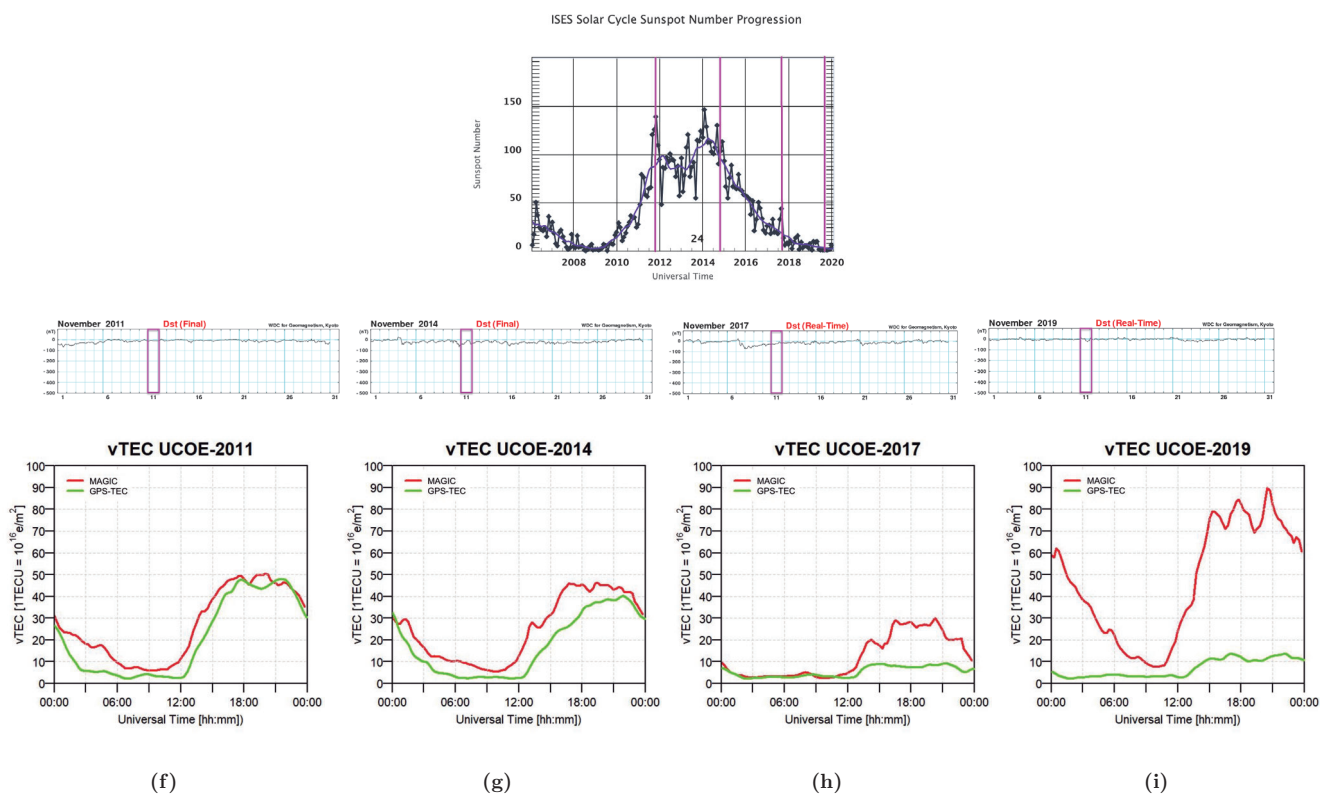


Figura 4.15: Comparación entre MAGIC y GPS-TEC en diferentes fases del CS24. En la gráfica superior se muestra el progreso del Ciclo Solar 24 y se señalan los años 2011, 2014, 2017 y 2019. En las gráficas intermedias se muestra el estado del campo magnético terrestre (índice Dst) durante estos años y se señala el día 11 de noviembre. En las gráficas inferiores se muestra la comparación de las estimaciones vTEC con GPS-TEC y MAGIC para cada día señalado.

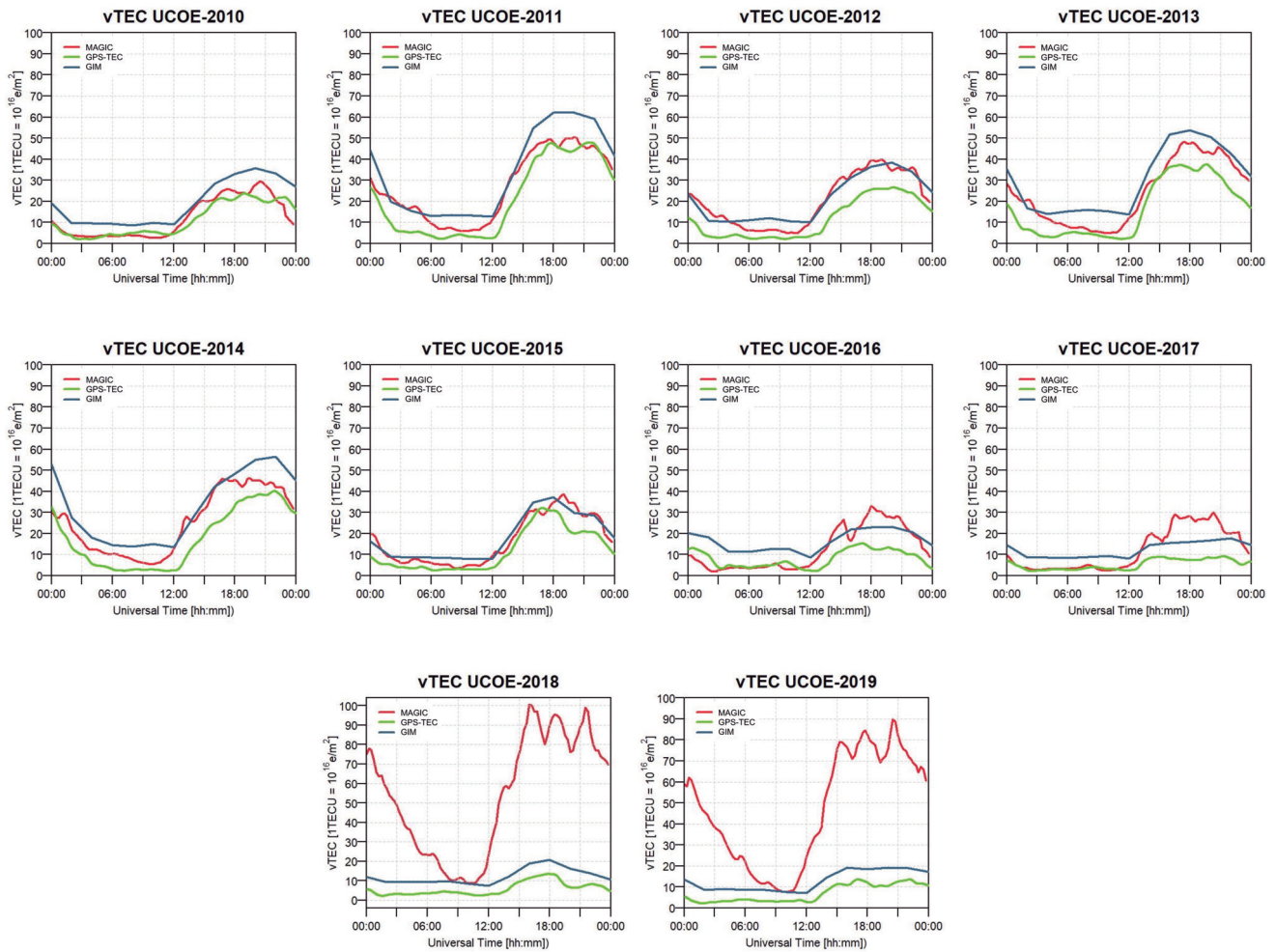


Figura 4.16: Comparación entre MAGIC, GPS-TEC y GIM del 11 de noviembre desde 2010 a 2019.

Año	Hora (UT)	MAGIC/GPS-TEC	GIM/GPS-TEC	GIM/MAGIC	GIM/IRI	MAGIC/IRI
2010	06:00	-15 %	115 %	156 %	NA	NA
	20:00	33 %	75 %	31 %	NA	NA
2011	06:00	186 %	382 %	68 %	NA	NA
	20:00	1 %	33 %	31 %	NA	NA
2012	06:00	147 %	343 %	79 %	NA	NA
	20:00	38 %	51 %	9 %	NA	NA
2013	06:00	49 %	202 %	101 %	NA	NA
	20:00	39 %	62 %	16 %	NA	NA
2014	06:00	275 %	478 %	54 %	NA	NA
	20:00	14 %	41 %	24 %	NA	NA
2015	06:00	116 %	247 %	60 %	NA	NA
	20:00	-22 %	-23 %	-1 %	NA	NA
2016	06:00	-12 %	154 %	190 %	203	4
	20:00	125 %	104 %	-9 %	-3	6
2017	06:00	27 %	178 %	118 %	144	11
	20:00	188 %	93 %	-32 %	-25	10
2018	06:00	401 %	134 %	-53 %	-39	29
	20:00	1147 %	132 %	-81 %	-77	19
2019	06:00	335 %	148 %	-42 %	-35	12
	20:00	561 %	55 %	-76 %	-70	24

Tabla 4.3: Variación porcentual entre MAGIC/GPS-TEC, GIM/GPS-TEC, MAGIC/GIM, IRI/MAGIC, IRI/GIM, para los años 2010 al 2019. (NA= No aplica).

GPS-TEC siguen siendo muy similares en el mínimo diurno, MAGIC empieza a presentar una sobrestimación en el máximo diurno con respecto a MAGIC y GPS-TEC. Es a partir del año 2018 cuando MAGIC muestra un incremento de 1147 % a las 20:00 UT sobre GPS-TEC y GIM es -53% ¹ menor que MAGIC para la misma hora. En general, GPS-TEC y GIM presentan el mismo comportamiento entre sí durante todos los años, es decir, siempre existe una diferencia de 10 TECU entre ellos, siendo menores los valores v TEC de GPS-TEC. Aun cuando estadísticamente un día de todo el año no es representativo para el estudio de la física ionosférica, podemos confirmar que MAGIC no realiza una estimación adecuada cuando nos acercamos al mínimo solar.

Conociendo que MAGIC tiene como base de funcionamiento el modelo IRI95, se decidió correr el programa sin usar archivos RINEX de entrada para conocer el comportamiento del modelo y de esta manera tener un argumento más para descartar que los archivos RINEX son los que generan la discrepancia de los valores v TEC. Para esta prueba se tomó el día 11 de noviembre para los años 2016, 2017, 2018 y 2019, años en los que se comienza a observar una sobrestimación de v TEC por MAGIC respecto a GIM. En la Figura 4.17 se presentan las gráficas para estos años, donde se muestra 3 curvas: 1) valores TEC de GIM, 2) valores v TEC con el archivo RINEX de la estación UCOE como entrada en MAGIC y 3) valores v TEC del modelo IRI que ocupa MAGIC. En la Tabla 4.3, se muestran los resultados de esta prueba. Para todos los años, la forma de las curvas 2 y 3 son similares, y difieren mucho de la curva 1. Por lo que una vez más se descarta que los archivos RINEX influyan en el cálculo de v TEC y podemos inferir que el modelo IRI en MAGIC requiere de una actualización a una versión más nueva, ya que en las últimas versiones se han incluidos diferentes índices solares y geomagnéticos,

¹MAGIC se tomó como valor base.

así como parámetros que han mejorados las estimaciones. O bien, es necesario ampliar el conocimiento de las sub-rutinas del código MAGIC en caso de que el problema se origine en éstas.

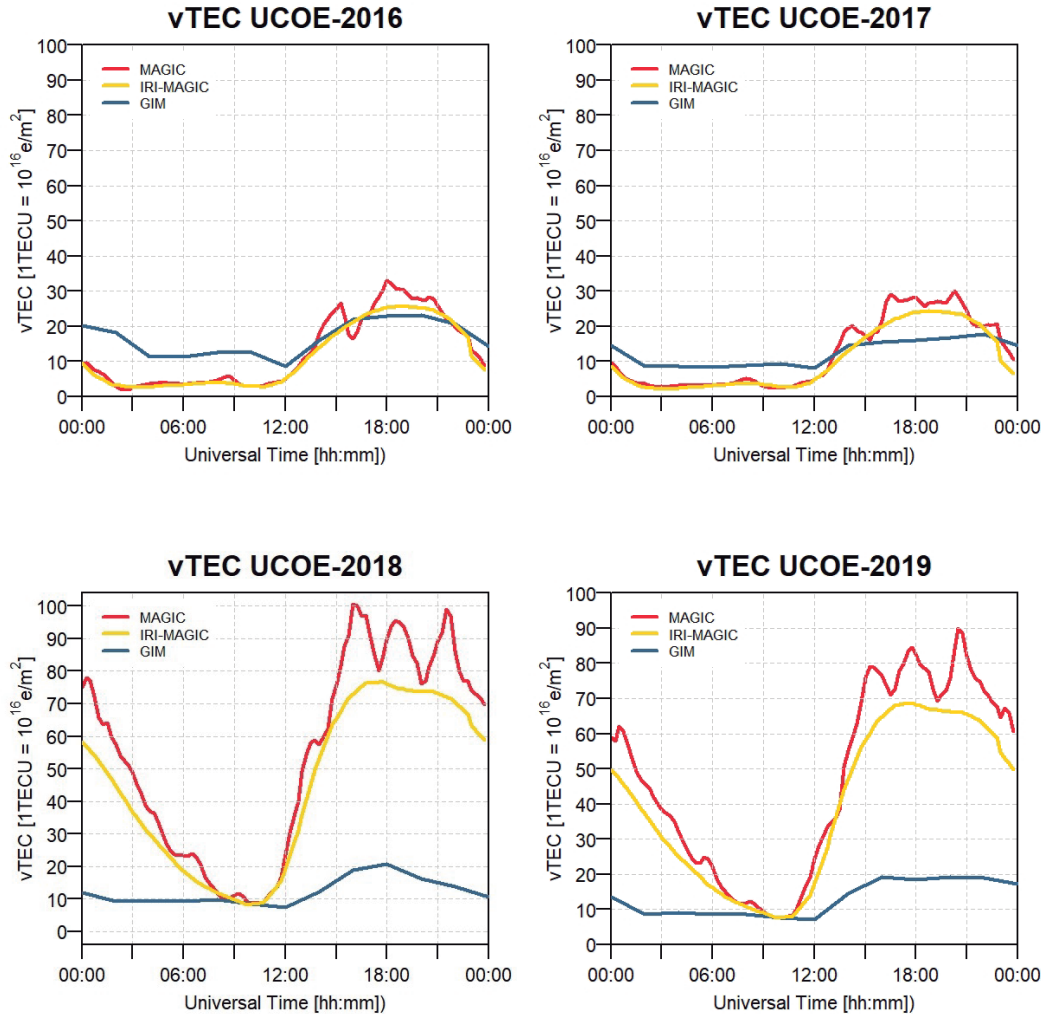


Figura 4.17: Funcionamiento del modelo IRI95 en MAGIC. Se presenta el comportamiento del vTEC durante el 11 de noviembre de 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019, estimado por GIM (línea azul), MAGIC con archivo RINEXobs (línea roja) y sin él (línea amarilla).

4.3.3. Cambio en la resolución espacial y temporal

Considerando que GIM tiene una resolución temporal de 2 horas y MAGIC de 15 minutos, se decidió modificar la resolución temporal de MAGIC, ya que este programa tiene como opción adicional una resolución máxima de 1 hora. A pesar de esto, el comportamiento de la curva descrita por MAGIC no cambia considerablemente y continúa existiendo la discrepancia entre las estimaciones.

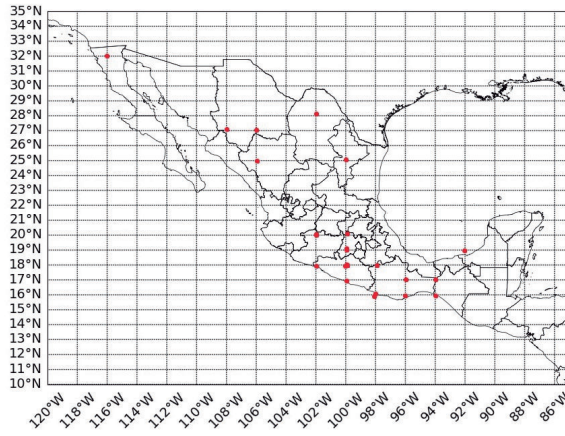
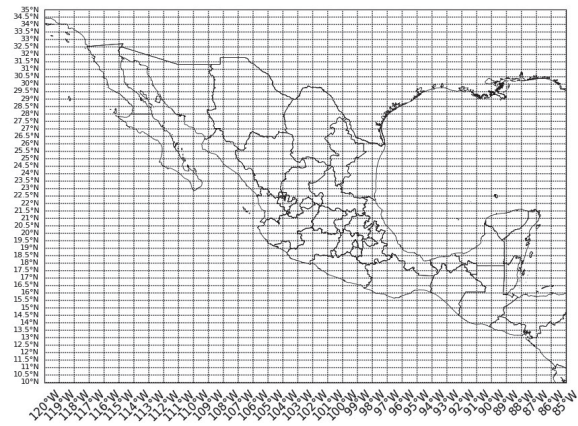
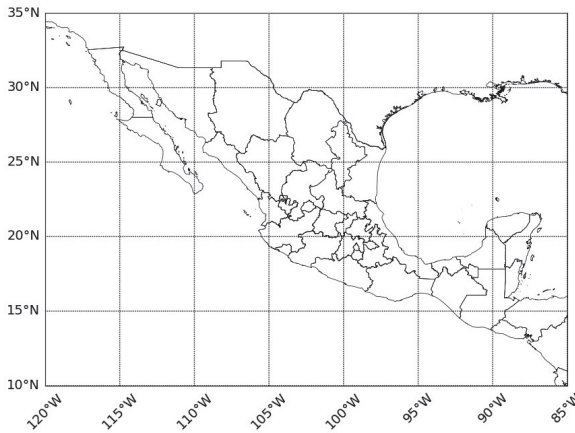
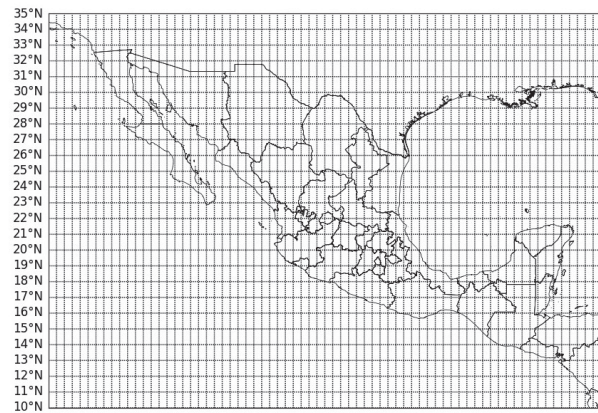
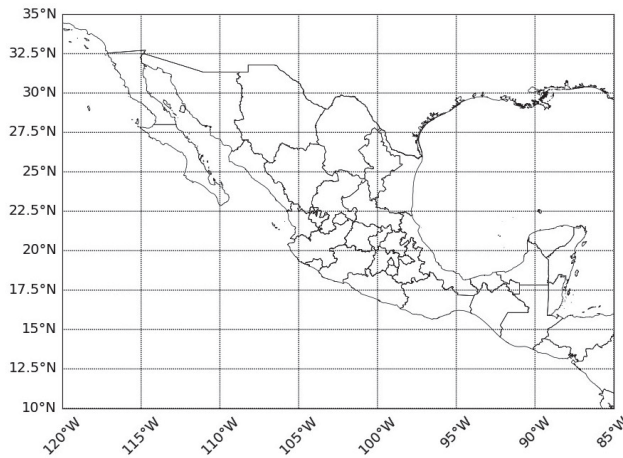
(a) $\Delta lat = 1^\circ$, $\Delta long = 2^\circ$ (b) $\Delta lat = 0.5^\circ$, $\Delta long = 1^\circ$ (c) $\Delta lat = 5^\circ$, $\Delta long = 5^\circ$ (d) $\Delta lat = 1^\circ$, $\Delta long = 0.5^\circ$ (e) $\Delta lat = 2.5^\circ$, $\Delta long = 5^\circ$

Figura 4.18: Cambio de resolución espacial. En el desarrollo de este trabajo la malla utilizada es a), la cual fue modificada a las siguientes mallas.

Por otra parte, debido a que MAGIC tiene la posibilidad de modificar la dimensión de la malla (ver Apéndice A), dentro de las pruebas se consideró modificar la resolución espacial. En esta prueba se modificó la malla sobre las que se estiman los datos vTEC, todas contemplan las mismas latitudes y longitudes variando el tamaño de cambio, es decir $\Delta latitud$ y $\Delta longitud$. Se tomaron cinco resoluciones diferentes:

1. $\Delta lat = 1^\circ$, $\Delta long = 2^\circ$, que es nuestra malla original;
2. $\Delta lat = 0.5^\circ$, $\Delta long = 1^\circ$,
3. $\Delta lat = 5^\circ$, $\Delta long = 5^\circ$,
4. $\Delta lat = 1^\circ$, $\Delta long = 0.5^\circ$,
5. $\Delta lat = 2.5^\circ$, $\Delta long = 5^\circ$ el mismo cambio que usa GIM (ver Figura 4.18).

Con el cambio de malla se consideró las condiciones geomagnéticas y el número de estaciones que procesa MAGIC debido a que la respuesta de la ionosfera es susceptible a las variaciones geomagnéticas y el filtro Kalman reduce el error con mayor número de datos disponibles. Para evaluar las estimaciones de MAGIC bajo diferentes condiciones geomagnéticas con distintas mallas se comparó el evento de septiembre de 2017 con un periodo quieto durante agosto 2017. En la Figura 4.19, se muestran los valores de vTEC de la estación UCOE para ambos periodos y cada panel muestra la estimación de vTEC en una malla diferente así como su comparación con GIM para tener una referencia. Tanto en periodo tranquilo como durante una tormenta geomagnética, existe una sobrestimación de MAGIC respecto a GIM, no obstante, se puede observar que durante algunos momentos del periodo de tormenta geomagnética las estimaciones tienen un mayor ajuste que en época de baja actividad geomagnética.

Respecto al tamaño de cambio en la malla podemos ver que MAGIC estima valores muy similares a GIM en ambas condiciones geomagnéticas en la malla que tiene $\Delta long = \Delta lat$ (5.0×5.0), y es importante señalar que en esta misma malla la estimación de los mínimos diarios no es exacta. En general, las curvas presentan un mayor suavizado cuando las mallas son más cerradas y conforme aumenta el tamaño de Δ se observan más variaciones en las curvas. También pudimos corroborar que la malla utilizada en este trabajo es una buena referencia, ya que durante el periodo quieto y el perturbado tienen el mismo comportamiento.

Al considerarse el número de estaciones que procesa el código, es decir, los archivos RINEXobs de entrada, se observa que entre más estaciones tenemos, la estimación de MAGIC difiere más de GIM. En la Figura 4.20 se observa que la serie de tiempo de UCOE estimada con un archivo RINEX tiene valores menores que aquella estimada con 22 archivos RINEX sin importar el tamaño de malla. Aquí es importante señalar que el archivo de entrada fue el propio de la estación UCOE, por lo que localmente realizó una buena estimación, es decir, para aquellas coordenadas dentro de la malla más cercanas a las coordenadas geográficas reales de la estación la interpolación es más exacta pero si tomamos cualquier punto dentro de la malla alejado de las coordenadas de UCOE, la estimación de los valores vTEC no serían una buena referencia de vTEC local.

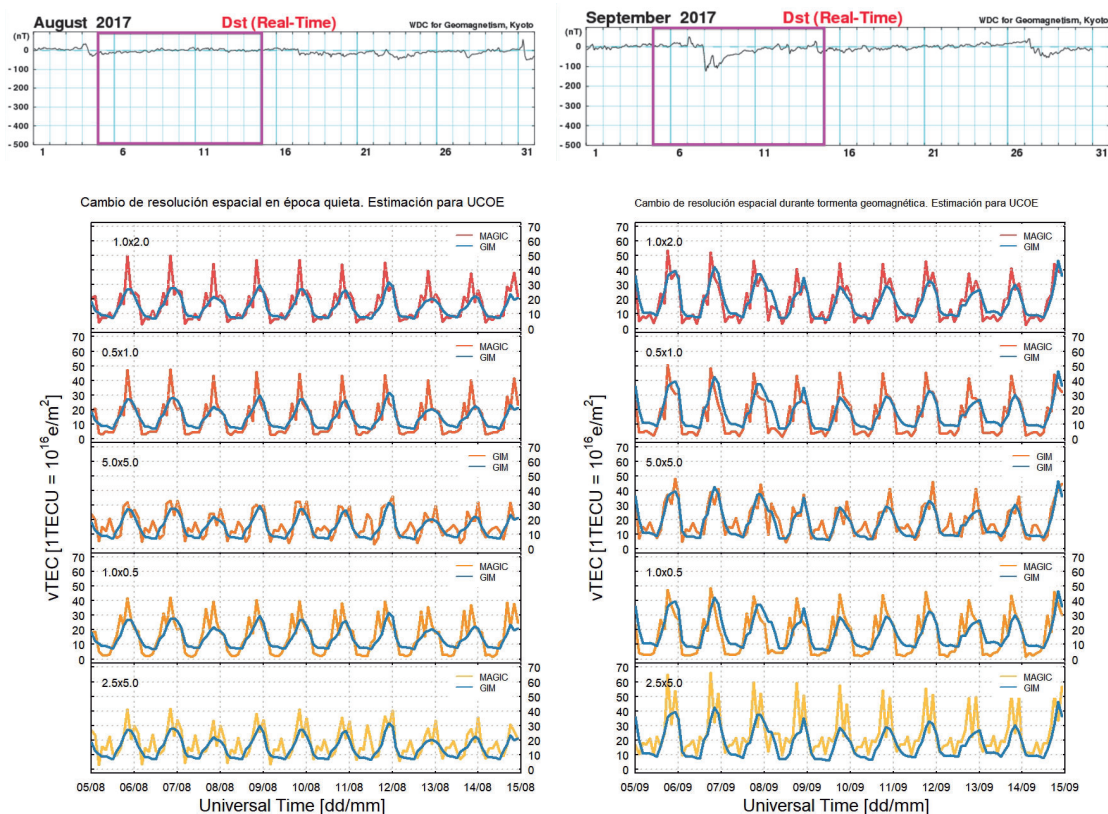


Figura 4.19: Comportamiento de vTEC con un cambio de resolución en GIM. a) Época quieta, condiciones del campo magnético tranquilas. b) Época de tormenta geomagnética

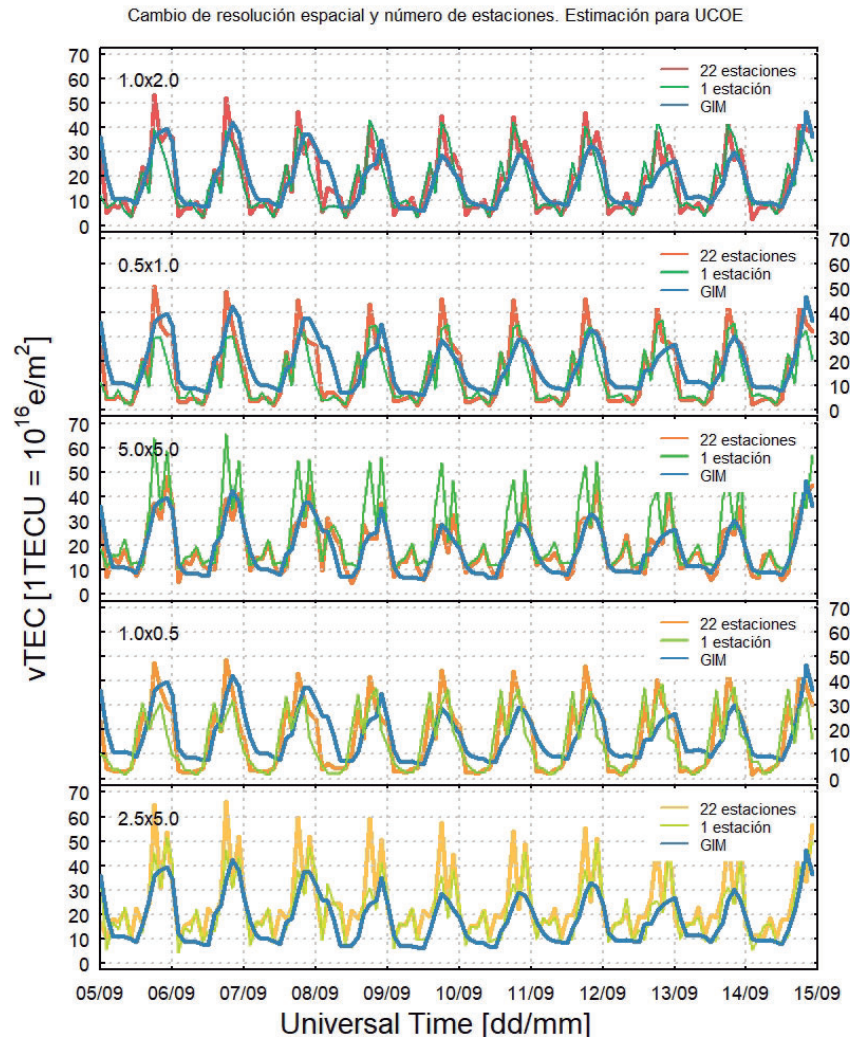


Figura 4.20: Comportamiento del vTEC con diferentes mallas de estimación y número de estaciones.

Ya que en [Araujo-Pradere y Husler \(2007\)](#) indica que cuando se dispone de 60 estaciones, la incertidumbre para el TEC es entre 2 y 3 $TECU$. Se tomó en cuenta un día del periodo quieto tomado en la prueba anterior y se corrió el software MAGIC con 1, 22 y 86 estaciones, que fueron todos los archivos RINEXobs disponibles para el 9 de agosto 2017. En la [Figura 4.21](#) podemos observar que la línea de 22 estaciones (roja) comienza aproximadamente en las misma $TECU$ que GIM (línea azul) y aunque durante el mínimo diurno permanece muy cerca de GIM, durante el máximo diurno tienen una diferencia de 20 $TECU$. Se esperaría que con 86 estaciones el ajuste entre MAGIC y GIM sea mayor; sin embargo, durante todo el día se obtuvieron valores TEC-MAGIC mayores que TEC-GIM. Finalmente, con las últimas dos pruebas se puede concluir que MAGIC genera, localmente, valores de vTEC más precisos e incluso presenta comportamientos que con GIM no se pueden observar, no obstante, que tal precisión genere valores tan elevados para una época de baja actividad solar, requiere de un estudio más detallado del propio código.

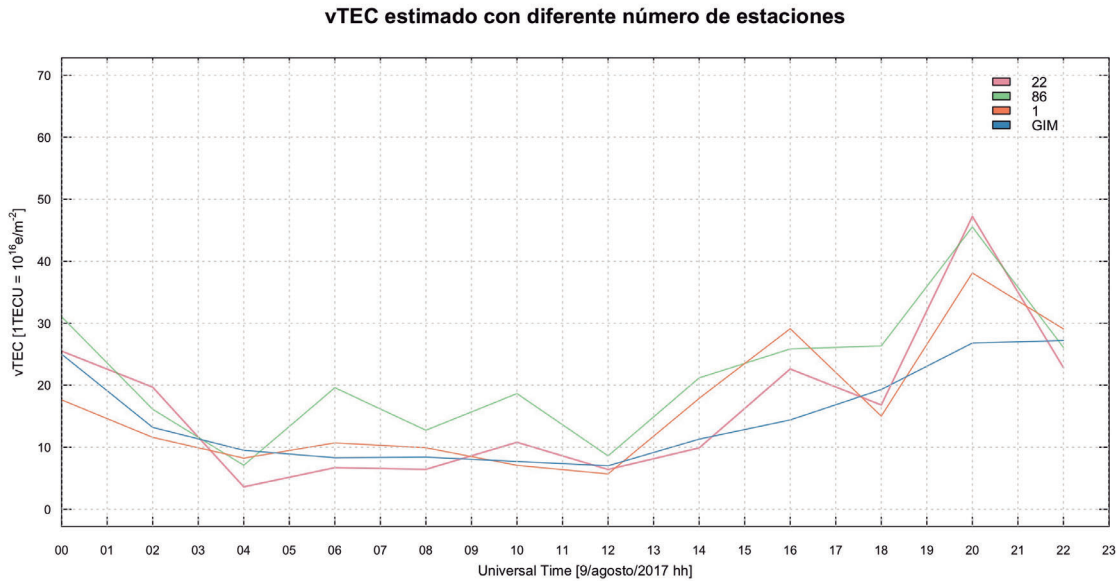


Figura 4.21: Comparación entre el ajuste que causa un mayor número de estaciones en la estimación de MAGIC.

4.4. Discusión

Si analizamos individualmente el comportamiento de las curvas de vTEC-MAGIC y las comparamos con las curvas de vTEC-GIM (ver Apéndice C), notamos que para estaciones que se localizan hacia el norte y hacia el sur de México existe una diferencia en la forma entre las curvas de ambas estimaciones. Mientras que para las estaciones al norte (MBIG, HPIG, CSIG, PDIG) las curvas extraídas de ambos mapas siguen el mismo patrón aunque con una diferencia de hasta 20TECU en lo máximos diurnos; para las estaciones localizadas hacia el sur y sobre las costas (SABY, TGIG, OAXA, PEIG, HUAT, TNPJ, TLIG, CAYA, ARIG, IGUA, PINO, ZIHU), el patrón estimado localmente y globalmente no es el mismo, ya que localmente existen dos picos en el mínimo diurno haciendo que no se identifique un mínimo.

Sin importar la fase del ciclo solar en la que nos encontremos, la precisión de MAGIC con respecto a GIM también depende de la densidad de estaciones para calcular los valores TEC, es decir, en el centro del país donde se localiza mayor número de estaciones GPS, las estimaciones realizadas por MAGIC son muy cercanas a las realizadas por GIM. Por ello, en la gráficas del Apéndice C, las estaciones UCOE, LNIG, YAIG, DEMA, SSNX, que geográficamente se encuentran muy cercanas y además con estaciones a su alrededor, tienen estimaciones más precisas. Las estaciones que se localizan sobre las costas del territorio mexicano tienen una menor precisión en el cálculo de vTEC debido a que en dirección de los océanos no se cuenta con estaciones GPS que disminuyan el error en la interpolación.

De acuerdo con trabajos como Reddybattula *et al.* (2019); Sergeeva *et al.* (2017), en los que

se comparan los GIM y algoritmos locales para la estimación de valores $vTEC$, se muestra una diferencia de 5 a 10 $TECU$ entre modelos por lo que para nuestro estudio se esperaría que las curvas descritas por MAGIC y GIM fueran semejantes en forma aunque exista una diferencia de $TECU$ para las misma ubicación geográfica. Sin embargo, tanto el comportamiento de las curvas como los valores son distintos. Por ello, a pesar de identificar un aumento o disminución de los valores observados por MAGIC y su mediana a 27 días previos, es difícil identificar mediante el índice W el nivel de perturbación ionosférica debido a que la diferencia momento a momento es alta, es decir la forma de la curva de los valores observados es completamente distinta a los esperados. Por otro lado, mediante los valores $vTEC$ -GIM se puede identificar, describir y clasificar las perturbaciones ionosféricas sobre territorio mexicano.

Por otro lado, la validación de los valores $vTEC$ calculados por MAGIC muestra que a partir del año 2018 los datos no son confiables y esto no depende de los archivos RINEXobs ni de su calidad.

Del año 2010 al 2017 MAGIC y GPS-TEC obtienen valores de $vTEC$ muy similares que a su vez se acercan a los valores estimados por GIM, esto confirma que para estos años el código MAGIC puede ser utilizado para el estudio ionosférico sobre México. Sin embargo, durante 2018 y 2019, MAGIC tiende a calcular valores mayores a los calculados por GIM y GPS-TEC, los cuales conservan la misma diferencia entre ellos a lo largo de todos años.

Las modificaciones en la resolución espacial y temporal generan pequeños cambios en los cálculos de MAGIC, que no necesariamente mejoran los resultados. Sin embargo, notamos diferencia en el tiempo de computo que se requiere para hacer el cálculo.

Conclusiones

Dado que la ionosfera es susceptible a los eventos de clima espacial como son las tormentas geomagnéticas pero además implica un impacto sobre la tecnología y la vida humana, esta tesis se suma al trabajo realizado por el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales, el Laboratorio Nacional de Clima Espacial y el Servicio de Clima Espacial Mexicano sobre la vigilancia y entendimiento de la ionosfera sobre territorio mexicano. El principal objetivo de este estudio fue analizar las variaciones del Contenido Total de Electrones durante periodos de tormenta geomagnética a lo largo del año 2017 y mediante el índice W caracterizar las posibles perturbaciones ionosféricas. El TEC se obtuvo a partir de datos de redes GPS locales como la red del SSN y TLALOCNet utilizando el código MAGIC y se compararon con datos TEC extraídos de los Global Ionospheric Maps con el propósito de determinar si el código MAGIC es adecuado para realizar estudios ionosféricos sobre México. Después del análisis presentado en el Capítulo 4 podemos concluir lo siguiente:

1. Con respecto a la caracterización de las perturbaciones ionosféricas mediante el índice W , podemos decir que:
 - a) Con MAGIC, si bien podemos observar un incremento o decremento de los valores observados (vTEC) respecto de los esperados (medTEC) durante los periodos de tormenta geomagnética, no podemos conocer el momento exacto en el que ocurrió la perturbación ionosférica mediante el índice W .
 - b) Con los valores extraídos de GIM podemos estimar con mejor precisión el momento y la intensidad en la que ocurre la perturbación ionosférica.
 - c) Para todos los eventos de tormentas geomagnéticas reportados en este trabajo, la ionosfera presentó una perturbación positiva durante la fase inicial y principal de la tormenta geomagnética y durante la fase de recuperación de ésta las perturbaciones a la ionosfera fueron negativas.
 - d) La categoría de la tormenta geomagnética no implica la categoría de la perturbación ionosférica. Para las dos tormentas geomagnéticas intensas la perturbación ionosférica fue de $W = +4$; con una diferencia en el valor de DTEC de 0.1 mientras que la diferencia del índice Dst fue de $1 nT$. Para las tormentas geomagnéticas moderadas, el valor del índice W fue de $+4$ y $+3$ con índice Dst de $-61 nT$ y $-74 nT$, respectivamente.
2. Existe una dependencia con la densidad de estaciones y los días a analizar en la estimación del vTEC por medio de MAGIC.

- a) Las regiones que cuentan con una mayor densidad de estaciones tienen una estimación de $vTEC$ más acertada a GIM, mientras que aquellas regiones que sólo cuentan con una o dos estaciones cercanas comienzan a tener discrepancias de entre 5 y 10 $uTEC$ en los máximos diurnos con respecto a GIM. Cabe señalar que aquellas estaciones que se localizan sobre las costas de México son las que presentan mayor diferencia con base a los valores $vTEC$ -GIM esto debido a que sobre los océanos no se tienen estaciones GPS y por lo tanto la interpolación es menos precisa.
 - b) Si bien, cuando se estiman valores $vTEC$ con MAGIC para un sólo día y se comparan con estimaciones de GIM o GPS-TEC, por ejemplo, podemos notar que existe una diferencia $> 10 uTEC$ en el máximo diurno estimado; cuando le pedimos a MAGIC que calcule valores $vTEC$ para más de dos días continuamente, la diferencia se reduce a $< 10 uTEC$.
3. Con base en el análisis de un solo día, pudimos concluir que existe una dependencia de la precisión de MAGIC con la fase del ciclo solar.
- a) Para la fase ascendente del CS24 (2010-2013) las estimaciones de MAGIC, GIM y GPS-TEC son muy cercanas entre sí. Durante estos años MAGIC y GPS-TEC tienen estimaciones similares tanto en el mínimo como en el máximo diurno y en relación con GIM tienen una discrepancia $> 10 uTEC$ en el máximo diurno.
 - b) Durante la fase del máximo solar de este ciclo (2014-2015) las estimaciones de los 3 códigos son muy precisas entre sí.
 - c) En la fase descendente (2016-2017) comienza a observarse una sobrestimación por MAGIC respecto de GIM y GPS-TEC.
 - d) Finalmente, en los años 2018-2019 cuando nos acercamos al mínimo del Ciclo Solar 24, MAGIC sobrepasa por más de 50 $uTEC$ las estimaciones realizadas por GIM y GPS-TEC en el máximo diurno. Lo que indica una falla sistemática de MAGIC en esta fase del ciclo.
 - e) **2017 es el último año en que los valores de $vTEC$ calculados con MAGIC son confiables.**
4. La resolución espacial no sólo influye en el tiempo de cómputo que le toma a MAGIC hacer la estimación de valores $vTEC$ (entre más abierta es la malla, el tiempo de computo es menor y viceversa), también influye en la precisión de las estimaciones tanto en periodos de baja actividad geomagnética como durante tormentas geomagnéticas.
- a) Cuando la malla es demasiado abierta ($\Delta = 5^\circ$), en el máximo diurno la estimación de MAGIC es muy cercana a GIM pero durante el mínimo diurno existe una sobrestimación de valores $vTEC$ -MAGIC respecto de GIM.
 - b) En cambio, si la malla es más cerrada ($\Delta = < 1^\circ$) la sobrestimación de MAGIC se da en los máximos diurnos mientras que en los mínimos diurnos los valores $vTEC$ -MAGIC están por debajo de las estimaciones de GIM.
 - c) Se pudo confirmar que la malla utilizada por defecto en este trabajo ($\Delta lat = 1^\circ$, $\Delta long = 2^\circ$) es la más acertada para el cálculo de $vTEC$ sobre México, puesto que

presenta valores muy cercanos a los valores $vTEC$ -GIM tanto en el máximo como en el mínimo diurno.

5. El número de estaciones que procesa MAGIC influye en la precisión de la estimación. Se observa que entre menor número de estaciones tenemos, los valores de MAGIC son más cercanos a GIM pero el comportamiento de la curva es distinto. Cuando tenemos un mayor número de estaciones el comportamiento de la curva se asemeja pero los valores $vTEC$ -MAGIC son mayores. Cabe resaltar que esta conclusión aplica para el año 2017 y es necesario hacer este tipo de análisis con otros años en distintas fases del ciclo solar para estudiar el comportamiento de forma más completa.

Así mismo, este trabajo pretendía usar el mayor número de estaciones que tuvieran un registro continuo de datos GPS durante todo el año, por esta razón el trabajo se desarrolló con datos disponibles de 22 estaciones.

En una primer etapa se recomendó revisar la calidad de los archivos RINEX sugiriendo que los desplazamientos de ciclo (*cycleslip*), que se ven como datos faltantes en un archivo RINEX, afectaban las estimaciones realizadas por MAGIC. Sin embargo, mediante la comparación con el código GPS-TEC se descartó que esto afectara a las estimaciones o que no se pudiera realizar. Esto se debe a que tanto GPS-TEC como MAGIC tienen subrutinas que usan de manera automática para el manejo de *cycleslip*, de las cuales se conoce poco sobre su funcionamiento y estudiarlas escapaba de los objetivos de este trabajo.

Cabe señalar que con base en el análisis estadístico (sección 4.1), se determinó que los valores $vTEC$ estimados con MAGIC eran elevados para la fase del ciclo solar a la que corresponde el año 2017 y por lo que se decidió hacer una comparación con los valores $vTEC$ de Mapas Ionosféricos Globales.

No obstante, que MAGIC sobrestime los valores $vTEC$ y describe más variaciones en las curvas que describen éstos, no quiere decir que estime erróneamente los valores $vTEC$, pues probablemente las estimaciones son más precisas. Sin embargo, si podemos decir que conforme nos acercamos al mínimo solar, en el caso del Ciclo Solar 24, la precisión de las estimaciones realizadas por MAGIC es menor y probablemente esto se debe al modelo IRI que MAGIC utiliza. MAGIC usa el modelo IRI95 como fondo y este no considera el uso de índices de actividad solar y geomagnética en su funcionamiento como lo hace el modelo IRI actualizado por lo que, se sugiere cambiar el modelo IRI. De igual modo debe considerarse tener comunicación con el equipo de la NOAA para mantener actualizado el código y poder adaptarlo a las necesidades de México.

4.5. Trabajo a futuro

En primera instancia se pretende mantener comunicación con el equipo de la NOAA que aportó el código MAGIC con el objetivo de conocer a detalle el funcionamiento de éste y poder hacer los cambios y las implementaciones necesarias para el estudio ionosférico en México, tanto en tiempo real como en tiempo desfasado.

Una vez realizadas las modificaciones adecuadas al código, es importante repetir el proceso de experimentación de esta tesis, para verificar la certeza de nuestra suposición. Así mismo, es necesario el estudio del Ciclo Solar 24 en su totalidad y comparar el comportamiento de la ionosfera con otros ciclos solares, conocer las variaciones regulares de la ionosfera para poder caracterizar adecuadamente las perturbaciones que pudiera sufrir ésta.

En este trabajo se observó un comportamiento de doble pico en los máximos diurnos al igual que durante los mínimos diurnos para todas las estimaciones de MAGIC. Como trabajo a futuro se sugiere la investigación de este comportamiento, que aunque se ha reportado y también se observa durante algunos días en las estimaciones de GIM, con MAGIC es más recurrente, por lo que hay que descartar si se debe al código o es una propiedad de la ionosfera.

Finalmente, con el fin de garantizar la calidad de los archivos RINEX, en próximos trabajos, se sugiere buscar el asesoramiento de personal experto en geodesia como el Laboratorio de Geodesia Satelital (LaGeoS) de la UNAM.

Subrutinas de Magic-USTEC

Como se mencionó en el Capítulo 3, el método de solución para Magic y USTEC se basa en las mismas subrutinas: `gmagic` y `gplot`, las cuales funcionan a través de una interfaz gráfica implementada en el lenguaje de MatLab y que usan de manera automática una serie de funciones desarrolladas en este mismo lenguaje para el manejo de los archivos RINEX y con ello calcular valores TEC.

A.1. GMAGIC

La subrutina `gmagic` es la encargada de recopilar y procesar los archivos RINEX observacionales y la información en ellos. En la Figura A.1 se observa la interfaz de `gmagic` la cual cuenta con 3 secciones importantes: **Processing Settings**, **Input Data Settings** y **Filter Settings**.

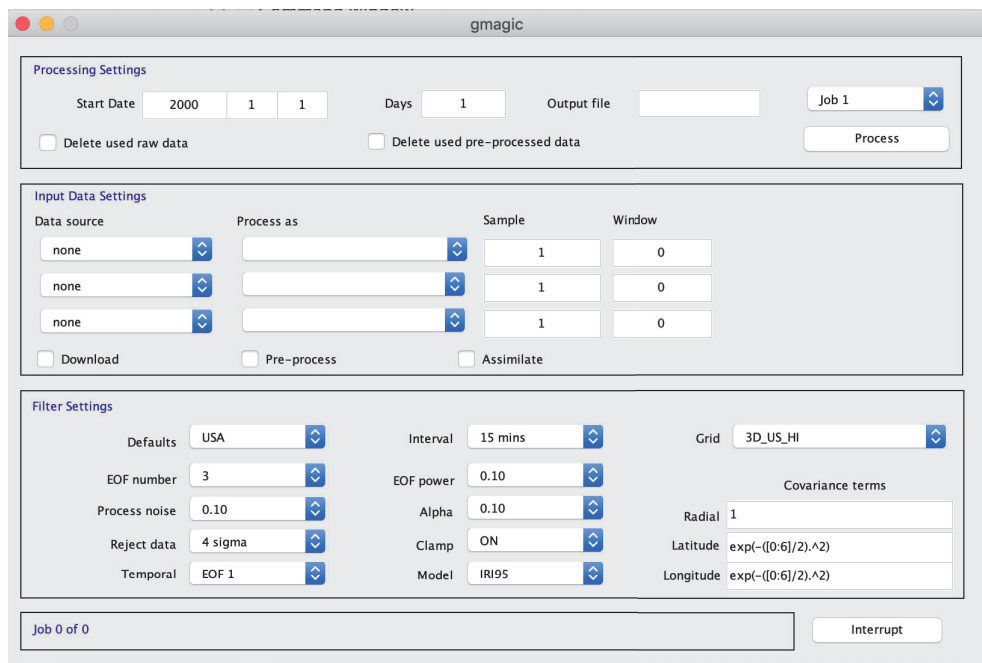


Figura A.1: Interfaz gráfica del programa `gmagic`

1. *Processing Settings*. En esta sección se coloca el periodo a analizar y el nombre que se le asignará a los archivos de salida. En *Start Date* se especifica la fecha de inicio del periodo que se requiere analizar. En *Days* el número de días que abarca el periodo, es decir, si se requieren 5 días, el sistema analizará 5 días a partir de la fecha que se le especifica. Y finalmente, en *Output file* se establece el nombre con el cual se va a reconocer a los archivos generados para este periodo, se deja a consideración del usuario. Una vez que se llenan las demás secciones, el proceso se inicia dando clic en la leyenda *Process*.
2. *Input Data Settings*. Aquí se debe especificar la lista de estaciones con las que el programa va a trabajar. La lista se elige en *Data source*; cabe mencionar que las listas se pueden modificar en la carpeta `./magicWorks/sitelist` y son los archivos con extensión `.sites` los cuales cuentan con las coordenadas cartesianas (XYZ) de cada estación a utilizar. Y en la subsección *Process as* se elige la opción *phase + RX bias* para señalar que el cálculo de TEC lo realice mediante la fase portadora y el sesgo satelital. Además, es necesario activar la casilla *Download* ya que ésta se encarga de descargar los archivos RINEX correspondientes a la lista de las estaciones que seleccionamos y los archivos sp3 que contienen las órbitas de los satélites. Es preciso mencionar que sólo descargará estaciones pertenecientes al IGS y en nuestro caso, este proceso lo hicimos manualmente, descargando los archivos RINEX del SSN y de TLALOCNet y los guardamos en carpetas por día por año en la ruta `./magicWorks/data/“año”/“día”`. Las carpetas de día se nombran por día del año (DOY). Las casillas de *Pre-process* y *Assimilate* también deben activarse ya que la primera se encarga de identificar los archivos RINEX y generar nuevos archivos binarios con extensión `.mat` con los cuales se realizará la asimilación con el filtro Kalman al activar la casilla *Assimilate*. Esta generará archivos con la resolución temporal especificada en la sección *Filter Settings* y con el nombre definido en la sección *Processing Settings* y la terminación `.mat`, además de un archivo cabecera que utilizará más adelante la interfaz **gplot**. Estos archivos contienen diferentes valores relacionados al cálculo del TEC y se guardaran en una carpeta con el mismo nombre especificado.
3. *Filter Settings*. En esta sección se establece el territorio, la malla, la resolución y las condiciones en las que trabajará el código, es decir, el modelo IRI de fondo a utilizar, el número de EOFs y el nivel de ruido, entre otros. El territorio se modifica en la casilla *Defaults*, donde elegimos USA ya que contempla el territorio mexicano; en la casilla *interval* elegimos la resolución temporal donde 15 minutos es la máxima resolución y 2 horas la mínima. En la casilla de *Grid* se elige la malla `3D_US_HI` para que sólo considere el territorio de México ya que abarcará desde 10° a 35° con $\Delta = 1^\circ$ en latitud y de -120° a -85° con $\Delta = 2^\circ$ en longitud. El tamaño de grid se puede modificar en el archivo `defgrid.mat` en la carpeta `./magicWorks/`.

A.2. GPLOT

La Figura A.2 muestra la interfaz gráfica de **gplot** que tiene como finalidad traducir los archivos binarios generados con `gmagic` en distintos productos finales que se pueden manejar más fácilmente.

Mediante la casilla *LOAD* se localiza la carpeta que contiene los archivos generados por gmagic, se selecciona el archivo *.mat* que no tiene una fecha específica, pues este es el archivo cabecera. Una vez seleccionado y cargado este archivo, el programa abre una pantalla donde proyecta el vTEC sobre el territorio que abarca la malla que se fijó en la interfaz de gmagic.

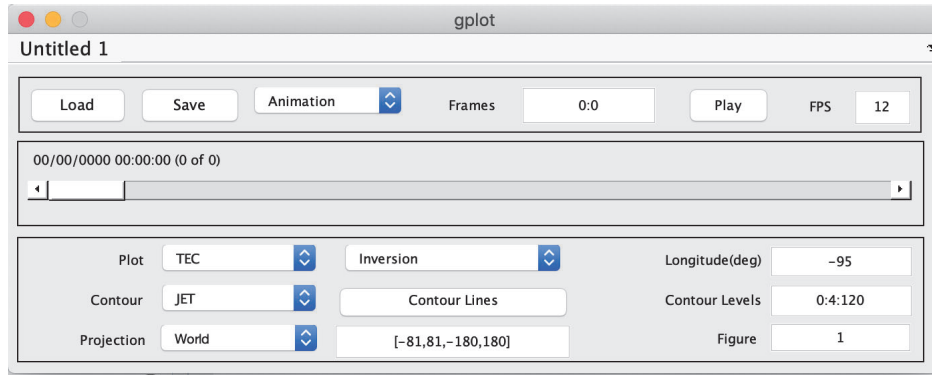


Figura A.2: Interfaz gráfica del programa gplot.

Entonces, en la tercera casilla se elige el tipo de producto que queremos obtener: Animation, Images o ASCII; en nuestro caso nos interesan los archivos ASCII. Posteriormente, en la casilla *Plot* se indica qué tipo de valores queremos obtener y elegimos entre *Inversion*, *Error*, *Median diff*, *Model* o *Model diff*; *Inversion* nos proporciona valores de TEC vertical.

Las casillas Countour y Projection World sólo afectan a la pantalla de proyección pero no a los archivos de salida; sin embargo, si desactivamos Contour Lines y elegimos US(M) en Projection el tiempo de computo es menor.

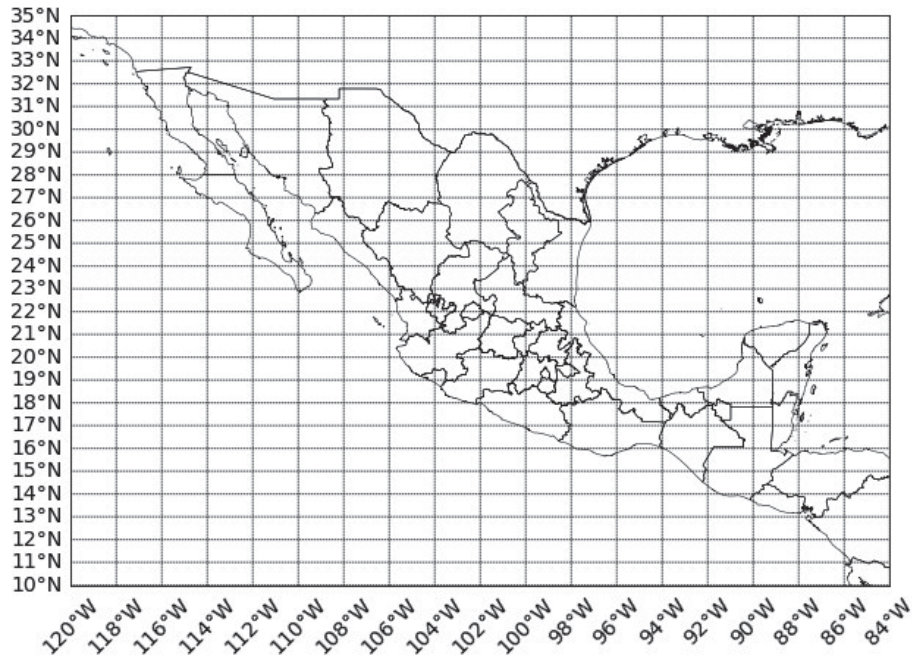
Para iniciar el proceso se hace clic en la casilla *Save* y se comienzan a generar archivos *.txt* en la misma carpeta donde están los archivos *.mat* de gmagic. Estos archivos son un conjunto de matrices bidimensionales con los valores de vTEC donde cada elemento individual de la matriz $m \times n$ representa un vértice de la malla determinada en el Filter Settings (ver Figura A.3).

Como podemos observar, cada renglón de la matriz son los valores correspondientes a una latitud y cada columna son los valores determinados para una longitud en específico. También podemos notar que el orden de las latitudes están invertidos, comenzando en latitud 0 y terminando en la latitud 35; sin embargo, sólo es para mantener un orden ascendente en el manejo de los datos. Y finalmente, todos los valores de la matriz, incluyendo latitudes y longitudes, están multiplicados por 10 para evitar cifras decimales, reducir el peso del archivo final y el trabajo de computacional sea más eficiente.

Estas matrices son de suma importancia en el desarrollo de este trabajo, ya que permiten extraer valores TEC de un punto geográfico en específico y poder realizar un análisis local. Sin embargo, es importante tener precaución, ya que hay un error asociado a las coordenadas geográficas reales de la estación GPS y el nodo a elegir.

0	-1200	-1180	-1160	-1140	-1120	-1100	-1080	-1060	-1040	-1020	-1000	-980	-960	-940	-920	-900	-880	-860	-840
100	196	193	185	169	150	129	111	94	79	66	58	53	50	49	49	48	48	47	47
110	192	190	183	169	149	127	107	90	74	62	53	48	46	45	45	45	45	45	44
120	182	181	177	166	148	126	106	87	70	57	48	43	41	41	41	42	42	42	42
130	172	171	169	162	149	130	109	88	69	54	45	40	38	38	39	39	39	40	40
140	162	161	160	158	149	136	117	93	71	54	43	39	37	38	38	39	38	38	38
150	150	150	150	151	151	147	132	107	80	58	46	41	40	39	39	39	38	37	36
160	137	138	138	142	150	158	152	128	95	67	53	48	47	45	42	41	39	37	35
170	123	124	125	129	139	153	158	140	105	76	62	59	57	52	47	43	39	36	33
180	108	109	109	110	117	125	125	110	86	71	70	72	68	59	51	44	40	35	32
190	95	95	93	90	92	91	84	69	59	69	87	92	80	64	52	43	38	33	30
200	85	83	79	74	71	64	49	34	37	70	105	107	82	59	46	39	35	30	27
210	77	73	69	63	60	56	53	57	69	84	90	79	60	45	36	32	30	26	24
220	71	66	61	55	51	48	48	52	59	65	64	56	45	37	31	28	26	24	23
230	66	61	55	48	42	36	32	33	39	44	44	40	35	31	28	26	25	24	23
240	62	56	50	41	32	23	19	21	28	33	34	32	30	28	27	25	25	24	24
250	59	54	47	36	25	16	13	18	25	31	31	29	28	27	26	25	25	25	25
260	57	52	44	34	22	15	14	20	27	31	30	29	28	27	27	26	26	26	26
270	54	50	43	33	23	18	20	26	31	32	31	29	28	27	27	26	27	27	27
280	51	47	41	32	25	23	26	31	33	34	32	30	29	28	28	28	28	28	28
290	48	44	38	32	27	27	31	34	35	35	33	31	30	29	29	29	29	29	29
300	44	41	36	32	30	32	35	37	38	36	35	33	32	31	30	30	29	29	29
310	43	39	36	34	35	37	40	40	40	38	37	35	33	32	31	30	30	30	29
320	43	41	39	39	40	42	43	42	41	40	38	36	34	33	32	31	30	30	30
330	48	47	45	44	45	45	44	43	42	40	39	37	35	34	32	31	31	30	30
340	52	51	49	48	47	46	45	44	42	41	39	37	35	34	33	32	31	30	30
350	55	54	52	50	49	48	46	44	43	41	39	37	36	34	33	32	31	30	30

(a)



(b)

Figura A.3: a) Archivo txt con la matriz de datos vTEC. b) Mapa donde cada vértice de la malla representa un dato de la matriz vTEC.

Software para revisar calidad de datos GPS

B.1. TEQC

Este programa consta de un conjunto de herramientas que lo hacen muy poderoso, para resolver muchos problemas de pre-procesamiento con datos de GNSS, especialmente en formato RINEX o BINEX. Este conjunto de herramientas consisten principalmente en módulos que permiten llevar a cabo:

1. Traducción
2. Edición de los datos
3. Control de calidad de los datos

La traducción se refiere a la conversión de formato binario (formato original en que el receptor escribe un archivo) a formato RINEX. La edición de datos es de utilidad cuando se requiere cortar un archivo en periodos de observación más cortos, juntar varios archivos en uno solo, extraer un periodo en concreto, o corrección de metadatos. Por su parte, el control de calidad de los datos incluyen la verificación de archivos RINEX observacional con o sin un archivo RINEX de navegación o efemérides binarias. Las tres funciones de las que *teqc* obtiene su nombre, *translation*, *editing*, and *quality checking*, pueden ser realizadas por separado, en parejas o todos juntos en una sola ejecución (Estey y Wier, 2014).

Este programa es libre y gratuito y puede descargarse desde <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html> para distintos sistemas operativos de Linux o Windows. El manual puede obtenerse en https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf

B.2. GIPSY-OASIS

El paquete GPS Infrared Positioning System (GIPSY) y Orbit Analysis Simulation Software (OASIS) consta de un software extremadamente versátil que se puede utilizar para el posicionamiento GPS y el análisis de la órbita de los satélites. Desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory de Caltech, puede proporcionar precisión de posicionamiento GPS a nivel de centímetros en líneas de base cortas e intercontinentales Grewal *et al.* (2020).

Para mayor información consultar <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php?page=pppdata>.

Comportamiento de $vTEC$ sobre México: Gráficas individuales

En este apartado se muestra la comparación entre valores $vTEC$ de MAGIC y GIM para cada una de las 22 estaciones, con el propósito de describir localmente el comportamiento del $vTEC$ durante los periodos de tormenta geomagnética estudiados en esta tesis.

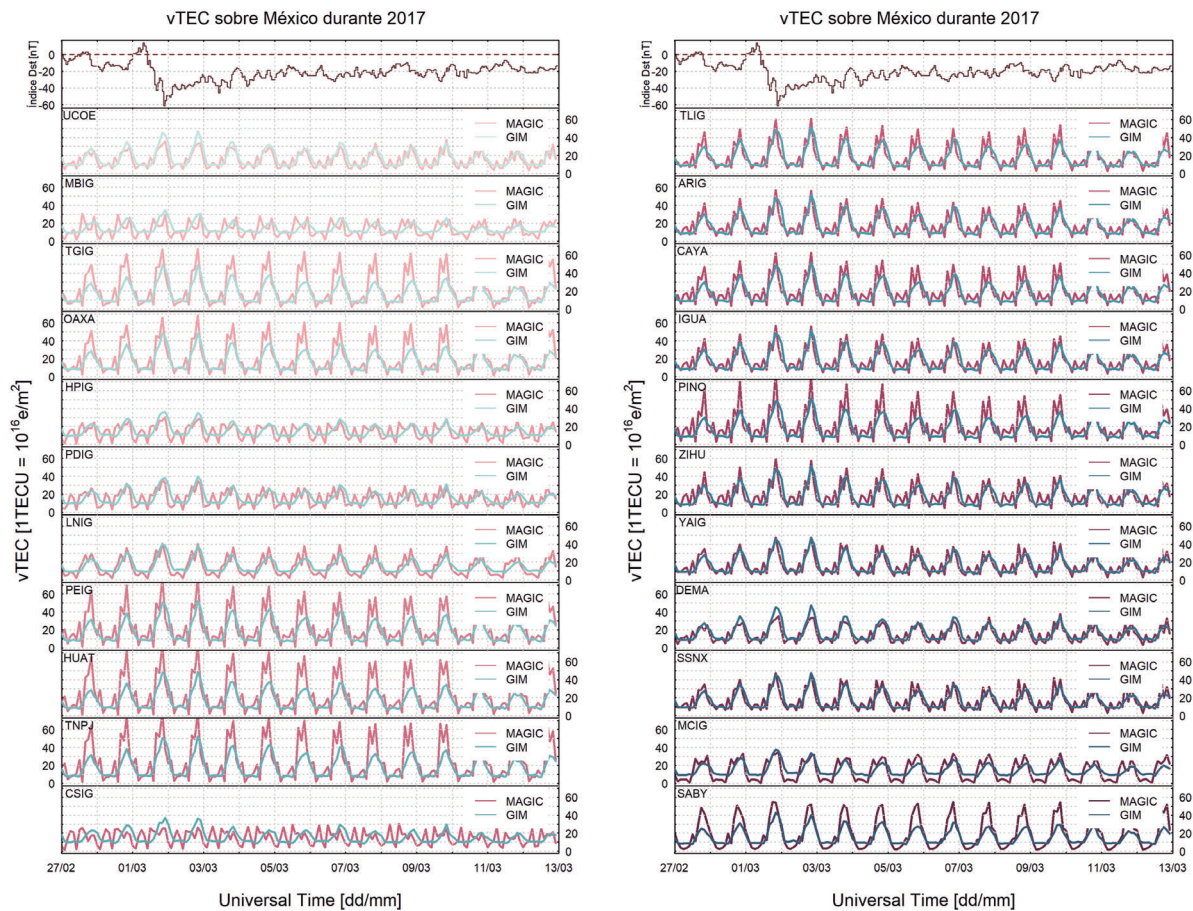


Figura C.1: vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de marzo de 2017.

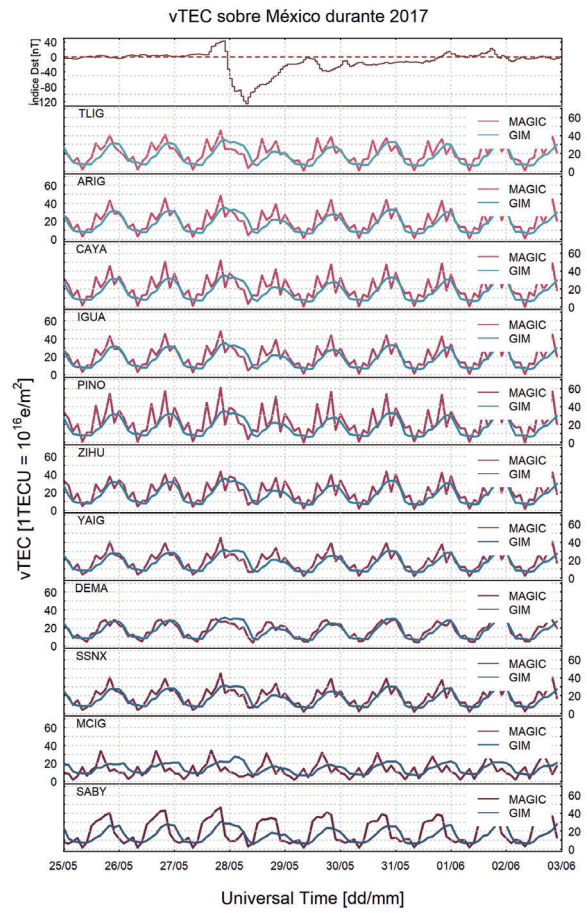
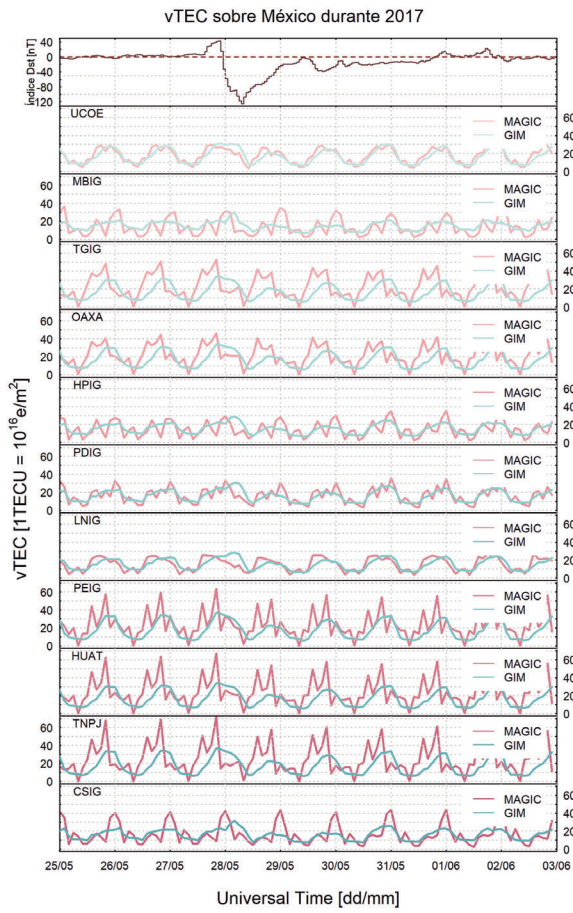


Figura C.2: vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de mayo de 2017.

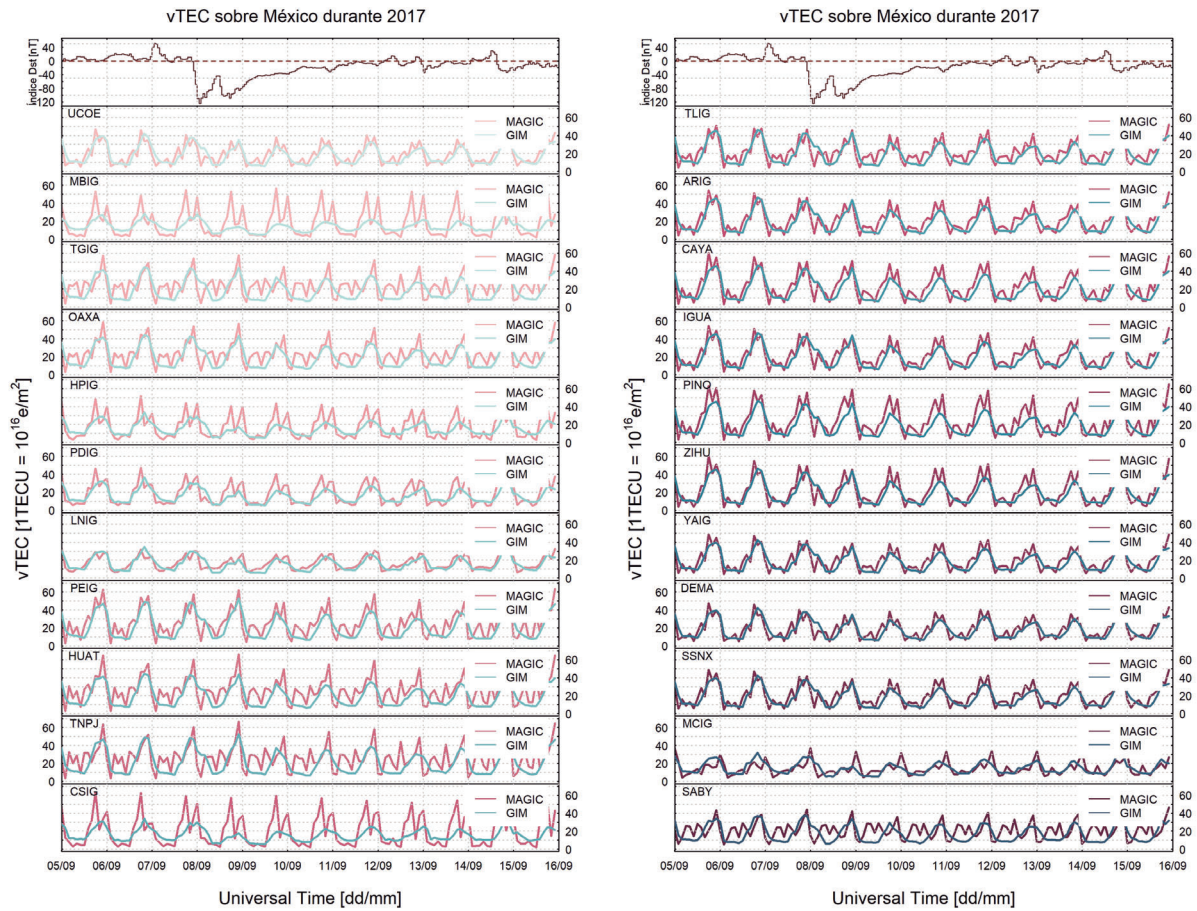


Figura C.3: vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de septiembre de 2017.

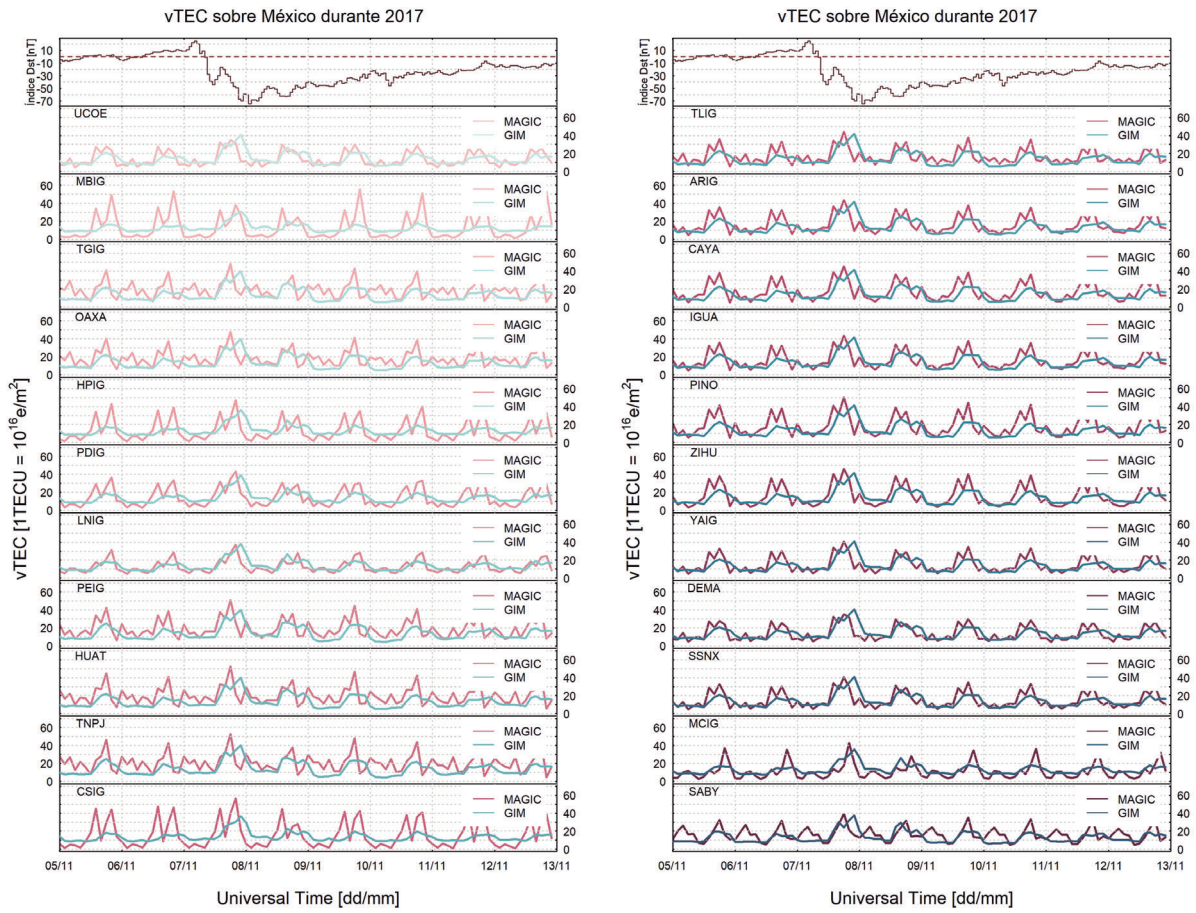


Figura C.4: vTEC sobre las 22 estaciones GNSS en México durante la tormenta geomagnética de noviembre de 2017.

Referencias

- Ansari, K., Corumluoglu, O., Verma, P., y Pavelyev, V. S. (2017). An Overview of the International GNSS Service (IGS). *Grenze International Journal of Computer Theory and Engineering*.
- Araujo-Pradere, E., Fuller-Rowell, T., Spencer, P., y Minter, C. (2007). Differential validation of the US-TEC model. *Radio Science*, 42(03):1–8.
- Araujo-Pradere, E. y Husler, M. (2007). US Total Electron Content Product Integrated Documentation.
- Arbesser-Rastburg, B. y Jakowski, N. (2007). Effects on satellite navigation. En *Space Weather Physics and Effects*, pp. 383–402. Springer.
- Bagiya, M. S., Thampi, S. V., Hui, D., Sunil, A., Chakrabarty, D., y Choudhary, R. (2018). Signatures of the solar transient disturbances over the low latitude ionosphere during 6 to 8 September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(9):7598–7608.
- Baker, D. (1998). What is space weather? *Advances in Space Research*, 22(1):7–16.
- Bilitza, D. (2018). IRI the International Standard for the Ionosphere. *Advances in Radio Science*, 16.
- Bilitza, D., Altadill, D., Truhlik, V., Shubin, V., Galkin, I., Reinisch, B., y Huang, X. (2017). International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*, 15(2):418–429.
- Blagoveshchenskii, D. (2013). Effect of geomagnetic storms (substorms) on the ionosphere: 1. A review. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53(3):275–290.
- Blagoveshchenskii, D. y Sergeeva, M. (2019). Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Advances in Space Research*, 63(1):239–256.
- Bothmer, V. y Daglis, I. (2007). *Space Weather: Physics and Effects*. Springer Praxis Books. Springer Berlin Heidelberg.
- Buonsanto, M. J. (1999). Ionospheric storms - A review. *Space Science Reviews*, 88(3-4):563–601.

- Cabral-Cano, E and Pérez-Campos, X and Márquez-Azúa, B and Sergeeva, MA and Salazar-Tlaczani, L and DeMets, C and Adams, D and Galetzka, J and Hodgkinson, K and Feaux, K and others (2018). TLALOCNet: A continuous GPS-Met backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research. *Seismological Research Letters*, 89(2A):373–381.
- Cairns, I. (1999). Ionospheric physics. <http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/lecture16/node3.html>. Consultado 10-10-2019.
- Cander, L. R. (2008). Ionospheric research and space weather services. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 70(15):1870–1878.
- Cander, L. R. (2019). *Ionospheric Space Weather*. Springer.
- CDDIS-NASA (2014). Gns atmospheric products. https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/atmospheric_products.html. Consultado 27 de enero de 2020.
- Chakraborty, M., Kumar, S., De, B. K., y Guha, A. (2015). Effects of geomagnetic storm on low latitude ionospheric total electron content: a case study from Indian sector. *Journal of Earth System Science*, 124(5):1115–1126.
- Charles, J. (2010). An Introduction to GNSS, GPS, GLONASS, Galileo and the other Global Navigation Satellite Systems. *NovAtel Inc*.
- Chen, P., Liu, H., Ma, Y., y Zheng, N. (2020). Accuracy and consistency of different global ionospheric maps released by IGS ionosphere associate analysis centers. *Advances in Space Research*, 65(1):163–174.
- Danilov, A. y Morozova, L. (1985). Ionospheric storms in the f2 region-morphology and physics. *Ge&Ae*, 25:705–721.
- De la Luz, Victor and Gonzalez-Esparza, J Americo and Sergeeva, Maria A and Corona-Romero, Pedro and González, L Xavier and Mejia-Ambriz, J and Valdés-Galicia, Jose F and Aguilar-Rodriguez, Ernesto and Rodriguez-Martinez, Mario and Romero-Hernandez, Esmeralda and others (2018). First joint observations of space weather events over Mexico. *Annales Geophysicae*, 36:1347–1360.
- Dungey, J. W. (1961). Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Physical Review Letters*, 6(2):47.
- Dutton, J. V. S. J. A. (2020). Cycle Slip, GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1728>.
- Estey, L. y Wier, S. (2014). Teqc Tutorial: basics of Teqc use and Teqc products. *UNAVCO Inc.: Colorado, CO, USA*.
- Fuller-Rowell, T. (2005). USTEC: a new product from the Space Environment Center characterizing the ionospheric total electron content. *GPS Solutions*, 9(3):236–239.

- Fuller-Rowell, T., Araujo-Pradere, E., Minter, C., Codrescu, M., Spencer, P., Robertson, D., y Jacobson, A. R. (2006). US-TEC: A new data assimilation product from the Space Environment Center characterizing the ionospheric total electron content using real-time GPS data. *Radio science*, 41(06):1–8.
- gAGE (2017). GNSS Format Descriptions. <https://gage.upc.edu/gFD/>. Consultado 15 abril 2020.
- Gatica-Acevedo, V. J., Sánchez-Meraz, M., y Sosa-Paz, C. (2015). Estudio del contenido total de electrones (TEC) sobre el territorio mexicano. *Científica*, 19(2):81–90.
- Gonzalez, W., Joselyn, J., Kamide, Y., Kroehl, H., Rostoker, G., Tsurutani, B., y Vasyliunas, V. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4).
- Gonzalez-Esparza, J. A., Sergeeva, M. A., Corona-Romero, P., Mejia-Ambriz, J. C., Gonzalez, L. X., la Luz, V. D., Aguilar-Rodriguez, E., Rodriguez, M., y Romero-Hernández, E. (2018). Space Weather Events, Hurricanes, and Earthquakes in Mexico in September 2017. *Space Weather*, 16(12):2038–2051.
- Goodman, J. M. (2006). *Space Weather Telecommunications*. Springer.
- Gopalswamy, N. (2005). Soho lasco cme catalog. http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.
- Grewal, M. S. y Andrews, A. P. (2014). *Kalman filtering: Theory and Practice with MATLAB*. John Wiley Sons.
- Grewal, M. S., Andrews, A. P., y Bartone, C. G. (2020). *Global Navigation Satellite Systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley Sons.
- Gulyaeva, T. y Stanislawski, I. (2008). Derivation of a planetary ionospheric storm index. En *Annales Geophysicae*, volumen 26, pp. 2645–2648. Copernicus GmbH.
- Hernández-Pajares, M., Juan, J., Sanz, J., Orus, R., Garcia-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S., y Krankowski, A. (2009). The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 83(3-4):263–275.
- Hernández-Anaya, S. S. (2018). *Variaciones en los rayos cósmicos detectados por el observatorio de rayos cósmicos de la CDMX asociadas con tormentas geomagnéticas durante el ciclo solar 24*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hobiger, T. y Jakowski, N. (2017). Atmospheric signal propagation. En *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, pp. 165–193. Springer.
- Imtiaz, N., Younas, W., y Khan, M. (2020). Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017. En *Annales Geophysicae*, volumen 38, pp. 359–372. Copernicus GmbH.

- Jonah, O., Coster, A., Zhang, S., Goncharenko, L., Erickson, P., de Paula, E., y Kherani, E. (2018). TID observations and source analysis during the 2017 Memorial Day weekend geomagnetic storm over North America. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(10):8749–8765.
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1):35–45.
- Lastovicka, J. (2002). Monitoring and forecasting of ionospheric space weather—effects of geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(5-6):697–705.
- Lilensten, J. (2007). *Space weather: research towards applications in Europe*, volumen 344. Springer Science & Business Media.
- Lopez-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., y Araujo-Pradere, E. A. (2012). The impact of large solar events on the total electron content of the ionosphere at mid latitudes. *Advances in space research*, 49(7):1167–1179.
- Lopez-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E. A., y Cruz-Abeyro, J. A. L. (2015). Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms. *Advances in Space Research*, 55(2):586–596.
- Memarzadeh, Y. (2009). *Ionospheric modeling for precise GNSS applications*. Tesis doctoral, Delft University of Technology.
- Mendez-Bedolla, V. H. (2019). *Estudio del comportamiento del vTEC durante tormentas geomagnéticas con Dst -150nT del Ciclo Solar 24*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Minter, C., Robertson, D., Spencer, P., Jacobson, A., Fuller-Rowell, T., Araujo-Pradere, E., y Moses, R. (2007). A comparison of Magic and FORTE ionosphere measurements. *Radio Science*, 42(03):1–13.
- Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.
- NGS-NOAA (2020). National Geodetic Survey. ngs.noaa.gov.
- Ogwala, A., Somoye, E. O., Ogunmodimu, O., Adeniji-Adele, R. A., Onori, E. O., y Oyedokun, O. (2019). Diurnal, seasonal and solar cycle variation in total electron content and comparison with IRI-2016 model at Birnin Kebbi. En *Annales Geophysicae*, volumen 37, pp. 775–789. Copernicus GmbH.
- Okoh, D., Onwuneme, S., Seemala, G., Jin, S., Rabiou, B., Nava, B., y Uwamahoro, J. (2018). Assessment of the NeQuick-2 and IRI-Plas 2017 models using global and long-term GNSS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 170:1–10.
- Ondoh, T. y Marubashi, K. (2001). *Science of space environment*. IOS Press.
- Prölss, G. (1993). On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *AnGeo*, 11(1):1–9.

- Reddybattula, K. D., Panda, S. K., Ansari, K., y Peddi, V. S. R. (2019). Analysis of ionospheric TEC from GPS, GIM and global ionosphere models during moderate, strong, and extreme geomagnetic storms over Indian region. *Acta Astronautica*, 161:283–292.
- Rodríguez-Martínez, M., Pérez-Enriquez, H. R., Carrillo-Vargas, A., y Haro-Corzo, S. A. (2017). Investigación de la ionosfera a latitudes bajas e intermedias de México.
- Rodríguez-Martínez, M., Pérez-Enríquez, H. R., Carrillo-Vargas, A., López-Montes, R., Araujo-Pradere, E. A., Casillas-Pérez, G. A., y Cruz-Abeyro, J. L. (2014). Ionospheric disturbances and their impact on IPS using MEXART observations. *Solar Physics*, 289(7):2677–2695.
- Romero-Hernandez, E and Denardini, CM and Takahashi, H and Gonzalez-Esparza, JA and Nogueira, PAB and de Pádua, MB and Lotte, RG and Negreti, PMS and Jonah, OF and Resende, LCA and others (2018). Daytime ionospheric TEC weather study over Latin America. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(12):10–345.
- Romero-Hernandez, E., Gonzalez-Esparza, J., Rodriguez-Martinez, M., Sergeeva, M., Aguilar-Rodriguez, E., Mejia-Ambriz, J., y De la Luz, V. (2017). Study of ionospheric disturbances over Mexico associated with transient space weather events. *Advances in Space Research*, 60(8):1838–1849.
- Schaer, S., Gurtner, W., y Feltens, J. (1998). IONEX: The ionosphere map exchange format.
- Schlegel, K. (2007). Ionospheric response. En *Space Weather-Physics and Effects*, pp. 203–224. Springer.
- Seemala, G. (2011). GPS-TEC analysis application. En *Tech. Rep.* Inst. for Sci. Res. USA.
- Seemala, G. y Delay, S. (2010). GNSS TEC data processing. En *2nd Workshop on Satellite Navigation Science and Technology for Africa, Trieste, Italy*, pp. 6–24.
- Sergeeva, M., Maltseva, O., Gonzalez-Esparza, J., De la Luz, V., y Corona-Romero, P. (2017). Features of TEC behaviour over the low-latitude North-American region during the period of medium solar activity. *Advances in Space Research*, 60(8):1594–1605.
- Sergeeva, M., Maltseva, O., Mejia-Ambriz, J.-C., Gonzalez-Esparza, A., De La Luz-Rodriguez, V. H., y Romero-Hernández, E. (2016). The estimation of the ionosphere state over Mexico region based on TEC data. *cosp*, 41:C1–1.
- Sergeeva, Maria A and Maltseva, Olga A and Gonzalez-Esparza, Juan Americo and Mejia-Ambriz, Julio Cesar and De la Luz, Victor and Corona-Romero, Pedro and Gonzalez, Luis Xavier and Gatica-Acevedo, Victor Jose and Romero-Hernandez, Esmeralda and Rodriguez-Martinez, Mario and others (2018). TEC behavior over the Mexican region. *Annals of Geophysics*, 61(1):104.
- Spencer, P. S., Robertson, D. S., y Mader, G. L. (2004). Ionospheric data assimilation methods for applications. En *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37556)*, pp. 510–517. IEEE.

- Teunissen, P. y Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer.
- Vassiliadis, D. (2007). Forecasting space weather. En *Space Weather Physics and Effects*, pp. 403–425. Springer.
- Watanabe, K., Masuda, S., y Segawa, T. (2012). Hinode flare catalogue. *Solar Physics*, 279(1):317–322.
- Xu, G. y Xu, Y. (2016). *GPS: theory, algorithms and applications*. Springer.
- 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.
- Zolesi, B. y Cander, L. R. (2014). *Ionospheric prediction and forecasting*. Springer.