



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

Escuela Nacional de Estudios Superiores, ENES
unidad Morelia

Estudio del comportamiento del vTEC durante
tormentas geomagnéticas con $Dst \leq -150$ nT del
Ciclo Solar 24

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Víctor Hugo Méndez Bedolla

TUTORES PRINCIPALES:

Dr. Mario Rodríguez Martínez

Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Morelia

Dr. Román Pérez Enríquez

Centro de Geociencias, campus Juriquilla, UNAM

Dra. Maria Sergeeva

Instituto de Geofísica, unidad Morelia

Dra. Esmeralda Romero Hernández

Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey

Dr. Luis Xavier González Méndez

Instituto de Geofísica, UNAM

Morelia, Mich. junio de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

RESUMEN

En este trabajo de tesis, se analiza el comportamiento del parámetro TEC (contenido total de electrones) dentro de territorio mexicano (entre 10° y 35° de latitud norte y entre 80° y 100° de longitud oeste) durante las tormentas geomagnéticas más intensas (índice $Dst \leq -150$ nT) del ciclo solar 24, utilizando el código US-TEC. Este código calcula el vTEC proyectado a lo largo de la vertical que se encuentra presente en la ionosfera terrestre. Este proceso se repitió para cada una de las cuatro tormentas geomagnéticas encontradas. El método utiliza el retraso de la señal de un receptor en tierra y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Los datos de GPS utilizados, provienen de las estaciones fijas del Servicio Sismológico Nacional (SSN) distribuidas a lo largo y ancho del territorio mexicano. El valor vTEC de las diferentes líneas de visión entre los receptores y los múltiples satélites, permite determinar la densidad de electrones en diferentes puntos sobre la ionosfera, atribuidos principalmente a la región F2. Al combinar estos valores junto con el modelo ionosférico IRI95 y la asimilación de datos mediante el filtro Kalman, podemos reconstruir el estado de la ionosfera aún en zonas donde no existen receptores. Con base en lo anterior, se construyeron lo que se conoce como mapas TEC. Para poder conocer el efecto de las tormentas sobre la ionosfera, se eligieron dos estaciones fijas con la misma declinación magnética (D) y tres más con la misma componente horizontal de campo magnético (H). Al mismo tiempo, el índice ionosférico W, el cual nos ayuda a caracterizar el estado quieto/perturbado de la ionosfera, permitió la generación de mapas con este índice, lo que forma parte del principal aporte de este trabajo. El índice ionosférico se utilizó para identificar espacialmente las zonas donde se observó mayor afectación. Finalmente, como parte de los resultados principales de este trabajo, se encontró que la tormenta de agosto de 2018 provocó el mayor aumento (44 TECu), mientras que la tormenta de marzo de 2015 tuvo la menor diferencia de TEC con -21 TECu ($1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ e/m}^2$), ambos valores comparados con la mediana TEC a 27 días previos. Por otro lado, las perturbaciones ionosféricas intensas positivas y negativas, observadas a través del índice W, ocurrieron durante diciembre y junio de 2015, respectivamente. Cabe mencionar que este tipo de investigaciones forman parte de los intereses científicos y divulgativos del Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE), de la ENES, Morelia y del Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX).

ABSTRACT

This thesis is about TEC (Total Electron Content) behaviour during the four most intense geomagnetic storms ($Dst \leq -150 \text{ nT}$) occurred in the 24th solar cycle. Regionally, the study is performed over Mexican territory (from 10° to 35° latitude and from 80° to 100° longitude) using the US-TEC code. This code calculates the total electron content perpendicular to the ground standing route ($vTEC$) found on the ionosphere. The process was repeated for each of the four intense geomagnetic storms found using the TEC calculation. Observational data from several ground base stations of the Seismologic National Service distributed over different latitudes and longitudes has been used. Calculated TEC values coming from different lines of sight between the network and the GPS satellites were used to approximate total electron density over different points in the ionosphere (mainly attributed to the F2 region). Using the map TEC technique, combined with the ionospheric model IRI95 and the Kalman filter, a three dimensional map electron density over the ionosphere can be constructed every 15 minutes. In order to see the ionospheric effect, two stations with the same declination (D) magnetic component and three more stations with equally horizontal magnetic component (H) were selected. Furthermore, the median values over 27 previous days (a solar rotation) is used as quiet day reference. Both TEC behavior and median TEC ($1 \text{ uTEC} = 10^{16} \text{ e/m}^2$) are compared before, during and after the geomagnetic storm phases. Among all the analyzed storms, the highest positive TEC value was on August 2018 and the highest negative TEC value was on March 2015. Additionally, positive and negative ionospheric disturbances were found on December and June, respectively, on the same year (2015). This index represents the disturbance degree on the ionosphere. Additionally, a double diurnal maximum or DDM was found on the diurnal variation TEC over some stations during the geomagnetic activity. Finally, it is worth to mention that this kind of research is of special interest for the scientific and divulgative community of the GeoScience Laboratory (LACIGE) of the ENES Morelia campus and the Mexican Space Weather Service (SCiESMEX).

*El universo no sería mucho,
si no fuese el hogar de las personas que amas.*

— *Stephen Hawking*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi hermosa familia, por todo su apoyo, comprensión y cariño. En especial a la persona que fue el pilar de mi familia y mi figura paterna durante la mayor parte de mi vida; mi abuelo Víctor.

A mi asesor el Dr. Mario Rodríguez Martínez por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a esta universidad. De igual forma, a mis sinodales: el Dr. Román Pérez Enríquez, la Dra. Maria Sergeeva, el Dr. Luis Xavier González Méndez y la Dra. Esmeralda Romero Hernández que han intervenido en la mejora de este trabajo. A la máxima casa de estudios por formarme académicamente y de la cual estoy muy orgulloso de ser parte.

Gracias a CONACYT por la beca No. 821262 recibida durante mis estudios. Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN118119: Estudio del comportamiento del vTEC ionosférico durante tormentas geomagnéticas intensas del ciclo solar 24, así como al proyecto de Infraestructura de CONACyT INFR-2015-253691, Propuesta para equipar el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales de la ENES-UNAM unidad Morelia, ambos a cargo del Dr. Mario Rodríguez Martínez. Así mismo a la DGAPA-UNAM por la beca recibida para la conclusión de la tesis de maestría. De igual forma agradezco al Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) <http://www.lacige.unam.mx/>) de la ENES campus Morelia, por el apoyo recibido para desarrollar las diferentes corridas del código USTEC en sus servidores. Particularmente quiero agradecer al M. C. Ulises Olivares Pinto, al Ing. Pablo Alfonso García Cruz y al Ing. Froylán Hernández Rendón.

Un sincero agradecimiento también al equipo de la NOAA, particularmente a Tim y Dominic Fuller-Rowell por permitir el uso del código USTEC, así como al equipo del SCiESMEX, particularmente al Dr. Américo Gonzalez Esparza por lograr el convenio de colaboración con la NOAA para el uso de dicho código en esta investigación.

También agradezco el apoyo de datos observacionales provenientes de las redes de GPS del Servicio Sismológico Nacional (SSN), SSN-TLALOCNet y TLALOCNet del Servicio de Geodesia Satelital (SGS). Agradezco al personal del SSN y del SGS por el mantenimiento de estaciones, la adquisición de datos y el soporte de IT de estas redes. Las operaciones de la red TLALOCNet y SSN-TLALOCNet GPS han sido apoyadas por The National Science Foundation bajo el proyecto EAR-1338091 a UNAVCO Inc., los proyectos CONACyT 253760 y 256012 y los proyectos UNAM-PAPIIT IN109315-3 y IN104818-3 de E. Cabral-Cano y el proyecto UNAM-PAPIIT IN111509 de R. Pérez.

Por último, a todos mis amigos dentro y fuera de la universidad. Y a todos aquellos que he conocido durante mi vida universitaria ¡Muchas gracias!

CONTENIDO

1	MAGNETOSFERA-IONOSFERA	5
1.1	Campo Magnético Terrestre	5
1.2	Tormentas Geomagneticas	6
1.3	Índice Geomagnético Dst	6
1.4	Ionosfera Terrestre	8
1.5	Regiones y Capas Ionosfericas	8
1.5.1	Región D	10
1.5.2	Región E	10
1.5.3	Región F	10
1.6	Variaciones Regulares	11
1.6.1	Variación Diurna	11
1.6.2	Variación Estacional	12
1.6.3	Variación con la Rotación del Sol	13
1.6.4	Variación con el Ciclo Solar	13
1.7	Variaciones Irregulares	13
1.7.1	Perturbación Ionosférica	14
1.7.2	Doble Máximo Diurno o DDM	14
1.8	Indice Ionosferico W	15
2	MONITOREO DE LA IONOSFERA USANDO GNSS	17
2.1	Sistemas GNSS para el monitoreo de la ionosfera	17
2.1.1	Segmento espacial	18
2.1.2	Segmento de control	18
2.1.3	Segmento de usuarios	19
2.2	Conceptos Básicos	19
2.3	Archivo Observacional RINEX	20
2.4	Cálculo del Posicionamiento de un receptor	22
2.5	Cálculo del Contenido Total de Electrones (TEC)	23
2.6	Aproximación a la ionosfera utilizando GPS	24
2.7	Mapas TEC	25
3	US-TEC	27
3.1	Interfaces gráficas: gmagic y gplot	27
3.2	Filtro de Kalman	29
3.3	Red de estaciones GPS	31
3.3.1	Estaciones en Coordenadas Geomagnéticas	31
3.4	Mapas del Índice Ionosférico W	35
4	CASOS DE ESTUDIO (RESULTADOS)	37
4.1	Evento del 17 de marzo de 2015	37
4.2	Evento del 23 de junio de 2015	45
4.3	Evento del 20 de diciembre de 2015	53
4.4	Evento del 26 de agosto de 2018	61
4.5	Resultados generales y Discusión	70
5	CONCLUSIONES	73
5.1	Trabajo a Futuro	74
	Bibliografía	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquematación de la magnetosfera deformada por la acción del viento solar. Tomado de: Kivelson, M.G. and Bagenal, F., [2014] . 6
Figura 2	Esquematación de las tres fases de una tormenta geomagnética a través del índice Dst. Tomado de: Kamide, Y. et. al., [1998] . 7
Figura 3	Representación esquemática de la formación de las capas ionizadas en la atmósfera. Tomado de: Bohm, J. and Schuh, H., [2013] . 9
Figura 4	Regiones y capas de la ionosfera dadas por la densidad de electrones por centímetro cúbico. Tomado de: Kivelson, M. G. y Russell, C. T. [1996] . 9
Figura 5	Efecto fuente que eleva el plasma ionosférico a mayores alturas a causa del movimiento del campo eléctrico perpendicular al magnético (ExB), la gravedad (g) y gradientes de presión (∇p). Tomado de: Kelley M. C. [1989] . 11
Figura 6	Variación a lo largo del año de las concentraciones de oxígeno y nitrógeno a 300 km de altura a latitudes medias de acuerdo a tres modelos diferentes. Tomada de: Hargreaves, J.K., [1992] 12
Figura 7	Variación de las frecuencias críticas a lo largo de diferentes ciclos de manchas solares. Notesé además la variación estacional sobre todo en la frecuencia F2. Tomado de: Hargreaves, J.K., [1992] 13
Figura 8	Patrón de Doble Máximo de densidad TEC Diurno observado a latitudes medias (panel izquierdo) y bajas (panel derecho) durante el 4 de febrero y 15 de noviembre de 1984. Tomadas de: Pi, X., et. al., [1993] 15
Figura 9	Constitución de un sistema de navegación por satélite. Tomado de: Subirana, J. S. et. al., [2013] . 17
Figura 10	Tipos de órbitas de los satélites con respecto a la eclíptica. Tomado de: Ghasemi, A., Abedi, A., & Ghasemi, F. [2013] . 18
Figura 11	Pasos para determinar posición y tiempo utilizando un sistema GNSS. Tomado de: Jeffrey, C. [2010] . 20
Figura 12	Camino aparente de la señal entre el satélite y el receptor. Tomado de: Ghasemi, A., Abedi, A., & Ghasemi, F. [2013] . 21
Figura 13	Diferencia de tiempo entre el emisor y el receptor también conocida como tiempo de propagación de la señal. Tomado de: Jeffrey, C. [2010] 22
Figura 14	Ejemplo de la cabecera y cuerpo de un archivo observacional RINEX. 23
Figura 15	a) Los puntos equidistantes a un satélite producen una esfera. b) Plano de intersección que equidista de dos satélites. c) Segmento de intersección que equidista de tres satélites. Tomada de: Langley, R.B., [1991] 24
Figura 16	Esquematación del modelo de capa delgada de la ionosfera. Donde R es el radio de la Tierra, H es la altura donde se encuentra la concentración máxima de electrones, z es el ángulo del receptor hacia el satélite, z' es el ángulo entre la línea del IPP (Ionospheric Pierce Point) y el SIP (Sub-Ionospheric Point). Tomado de: Schaer, S. and Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique, [1999] . 24
Figura 17	Ejemplo de un mapa $v\text{TEC}$ sobre territorio mexicano. 25
Figura 18	Mallado definido por $\Delta\text{Latitud} = 1.5^\circ$ y $\Delta\text{Longitud} = 4^\circ$ dentro de US-TEC. 29

- Figura 19 Distribución de las estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional utilizadas para el procesamiento de datos de US-TEC. 32
- Figura 20 Componentes del campo magnético terrestre. 32
- Figura 21 Distribución de las estaciones MCIG y ZIHU sobre las líneas equipotenciales de declinación (D) del campo geomagnético (en grados). 34
- Figura 22 Distribución de las estaciones LPIG, RPIG y SABY sobre las líneas equipotenciales de la componente horizontal H de campo geomagnético (en nano Teslas). 34
- Figura 23 Mapa de la mediana TEC a través de los mapas TEC de días previos. 35
- Figura 24 **Panel superior:** Índice Dst durante la tormenta geomagnética de marzo de 2015. Las líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. **Paneles inferiores:** Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano. 39
- Figura 25 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 40
- Figura 26 Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 40
- Figura 27 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 41
- Figura 28 Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 41
- Figura 29 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 42
- Figura 30 Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 42
- Figura 31 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 43
- Figura 32 Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 43
- Figura 33 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 44
- Figura 34 Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 44
- Figura 35 **Panel superior:** Índice Dst durante la tormenta geomagnética de junio de 2015. Las líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. **Paneles inferiores:** Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano. 47
- Figura 36 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 48
- Figura 37 Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 49
- Figura 38 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 49
- Figura 39 Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 50
- Figura 40 Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 50

Figura 41	Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 51
Figura 42	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 51
Figura 43	Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 52
Figura 44	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 52
Figura 45	Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 53
Figura 46	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 54
Figura 47	Panel superior: Índice Dst durante la tormenta geomagnética de diciembre de 2015. Las líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. Paneles inferiores: Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano. 55
Figura 48	Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 56
Figura 49	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 56
Figura 50	Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 57
Figura 51	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 57
Figura 52	Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 58
Figura 53	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 58
Figura 54	Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 59
Figura 55	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 59
Figura 56	Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 60
Figura 57	Panel superior: Índice Dst durante la tormenta geomagnética de agosto de 2018. Las líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. Paneles inferiores: Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano. 62
Figura 58	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 63
Figura 59	Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética. 63
Figura 60	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 64
Figura 61	Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética. 64

Figura 62	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 65
Figura 63	Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética. 65
Figura 64	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 66
Figura 65	Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética. 66
Figura 66	Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 67
Figura 67	Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética. 67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de una tormenta geomagnética con base en el valor mínimo del índice Dst. Referencia: Sugiura, M., and S. Chapman [1960] . 8
Tabla 2	Estado de la ionosfera según el índice ionosférico W. El signo (+) en W indica un incremento y el signo (-) una reducción. Referencia: Gulyaeva, T. L., and I. Stanislawska [2008] 16
Tabla 3	Algunos parámetros de las constelaciones GPS, Galileo y GLONASS. Tomado de: Awange, J.L., [2018] 19
Tabla 4	Identificador y coordenadas geográficas de las estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional utilizadas para el procesamiento de datos. 33
Tabla 5	Tormentas geomagnéticas intensas ocurridas durante el ciclo solar 24 y su correspondiente valor mínimo en el índice Dst. *Datos crudos sin verificación (ver www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp). 37
Tabla 6	Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015. 38
Tabla 7	Lista de ráfagas solares que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015. 38
Tabla 8	Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 23 de junio de 2015. 45
Tabla 9	Lista de ráfagas solares que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 23 de junio de 2015. 46
Tabla 10	Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de diciembre de 2015. 54
Tabla 11	Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 26 de agosto de 2018. 61
Tabla 12	Resumen con los índices Dst, W y δ con sus respectivas fechas, encontrados para las tormentas geomagnéticas intensas del ciclo solar 24. 69
Tabla 13	Porcentajes del doble pico diurno para cada una de las tormentas geomagnéticas intensas y las estaciones que los registraron. 71

INTRODUCCIÓN

Desde el impulso de lo que se conoce como la era espacial (lanzamiento del primer satélite artificial de la Tierra el 4 de octubre de 1957), el estudio de las relaciones que ocurren entre el Sol y la Tierra, han tenido un gran avance. Hoy en día, el estudio del clima espacial o meteorología del espacio, se define como la medición y análisis en tiempo real de condiciones en el Sol, el medio interplanetario, viento solar, magnetosfera y sus efectos en la atmósfera alta terrestre. Todos estos ambientes están poblados por el cuarto estado de la materia llamado también plasma; sin embargo, la interrelación entre estos sistemas es todo menos predecible.

Históricamente, Galileo Galilei quien fue uno de los primeros en llevar un registro de las manchas que observaba sobre la fotosfera del Sol. Dos siglos después, se comenzaron a registrar continuamente estas regiones, descubriendo así que el Sol pasa por un periodo de aparición y disminución de manchas cada once años aproximadamente. A partir de entonces, se han completado 23 ciclos solares y nos encontramos en la fase descendente del ciclo solar 24. Además, sabemos que este fenómeno cíclico es el resultado de la convección y la rotación diferencial que deforman las líneas de campo magnético en el Sol (Kivelson, M. G. y Russell, C. T. [1996]). Lo anterior también explica el porqué estas regiones se concentran sobre una estrecha franja latitudinal sobre ambos lados del ecuador solar y la causa de su apariencia oscura cómo un cambio ligero de temperatura entre ellas y el fondo (300 K menos aproximadamente).

Asociado a las manchas solares, existen dos tipos de fenómenos solares (Kivelson, M. G. y Russell, C. T. [1996]); las fulguraciones o *flares* y las eyecciones de masa coronal o CME en inglés. El primer término se refiere a destellos luminosos sobre la atmósfera solar, los cuales abarcan un intervalo amplio de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético y que son clasificados según la relación W/m^2 en cinco niveles: A, B, C para los menos intensos y M o X para los más intensos. La fulguración más famosa quizá es la del 1 de septiembre de 1859 conocida como el evento Carrington, la cual se estima que tuvo una clasificación X₄₅ (Cliver, E.W. and Dietrich, W.F., [2013]), produciendo incluso auroras visibles hasta latitudes bajas como las de México (González J. A. and Cuevas M. C. [2018]). La radiación en forma de luz impacta directamente a la atmósfera alta de la Tierra, a diferencia de las eyecciones. Por otro lado, las eyecciones de masa coronal hace referencia a la liberación violenta del plasma sobre la corona solar hacia el medio interplanetario provocadas por la torcedura de un intenso campo magnético solar. En su interior, una eyección contiene un campo magnético interno, el cual no le permite mezclarse con ninguno otro plasma en lo que se conoce como campo magnético congelado. Las velocidades típicas de las eyecciones varían en relación al ciclo solar (Gopalswamy N. [2009]). Durante la fase mínima, las velocidades son cercanas a los 300 km/s, mientras que en el máximo son de 500 km/s. Puesto que las eyecciones son partículas y no radiación electromagnética como las fulguraciones, estas pueden durar uno o varios días en llegar a la órbita terrestre. Su geoefectividad o impacto con la Tierra estará dada por la posición de la mancha en donde se originó y la dirección en que fue expulsada.

El arribo de partículas solares a la vecindad de la Tierra no impacta directamente sobre las capas altas de la atmósfera, ya que antes, es desviado por una coraza magnética conocida como magnetosfera terrestre. Esta interacción es compleja, debido a los campos magnéticos y eléctricos que determinan la dinámica de las partículas. Por su geometría dipolar y la presión dinámica del viento solar, se deforma, siendo que las líneas de campo se comprimen en el lado día y se alargan hacia el lado noche. Cuando las partículas rodean y siguen las líneas de campo magnético, logran penetrar por las regiones polares o por el lado noche en un proceso conocido como reconexión

magnética. La compresión producida por la onda de choque y el plasma detras de ella son registrados en tierra como variaciones en la intensidad de campo magnético o también llamados tormentas geomagnéticas que son registradas y clasificadas en orden de intensidad por una red de observatorios localizados en diferentes partes del mundo (Mayaud P. [1980]) como por ejemplo; el índice de tiempo de perturbación de la tormenta o Disturbance Storm Time (Dst) en inglés.

El elemento clave para entender el acoplamiento entre ionosfera (atmósfera terrestre ionizada) y la magnetosfera son las corrientes que eléctricas a lo largo de las líneas que fluyen entre ambas regiones. Las de gran escala dentro de la magnetosfera son conocidas como: corrientes Chapman-Ferraro, de Birkeland, los anillos de corriente y la corriente en la magnetocola. Además de las corrientes, la magnetosfera alberga tres diferentes regiones de plasma: *tail lobes*, *plasma-sheet boundary layer* y *plasma sheet*. Esta última está poblada iónicamente de partículas de origen solar y ionosférico, siendo mayor de origen solar durante periodos quietos y de origen ionosférico durante actividad solar. Adicionalmente, se encuentra la plasmaesfera, una región de la magnetosfera de la Tierra que consiste en plasma de baja energía y que se encuentra por encima de la ionosfera. El límite exterior de la plasmaesfera se conoce como plasmapausa, que se define por un orden de caída de magnitud en la densidad del plasma. La respuesta de la ionosfera a eventos solares es una parte integral del clima espacial. Sus variadas características actúan a diferentes alturas en la ionosfera y atmósfera; por lo tanto, la morfología, los mecanismos y los efectos de la tormenta cambian de una región a otra.

En términos simples, la ionosfera es un *espejo eléctrico* situado entre los 60 y 1000 km de altura que permite que algunas señales viajen una distancia mayor gracias a la reflexión. A mayor frecuencia, mayor es la altura en la que se reflejan debido a una relación simple entre frecuencia y densidad de electrones. Sin embargo, si la frecuencia es demasiado alta, la señal viajará a través de este medio y ya no será reflejada. De ahí que su estudio radica en que es un medio altamente variable que afecta el camino y tiempo de propagación de una onda electromagnética (Mimno, H. R. [1937]). Por ejemplo, frecuencias en los GHz, típicas de los sistemas de navegación satelital, se propagan continuamente a través de las diferentes regiones ionosféricas y su precisión depende directamente del estado de este plasma. Una de las ventajas del retraso de la señal es que es posible estimar la densidad total de electrones en la ionosfera sobre el receptor. La densidad total de electrones (TEC) es una columna inclinada de un metro cuadrado de sección transversal que se traza desde el receptor hasta el satélite y que describe el comportamiento integral de los electrones contenidos en su volumen, contribuyendo a la suma principalmente la capa F2 (de mayor densidad de electrones) (Schaer, S. and Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique, [1999]). Este es uno de los parámetros ionosféricos más importantes para las frecuencias únicas y duales de los sistemas GNSS. En los últimos años, el estudio de la ionosfera mediante el cálculo del TEC ha ido en aumento, así como la implementación de nuevos métodos y la predicción mediante modelos.

Como la mayor parte del TEC se ubica en la región F2, el efecto de las tormentas geomagnéticas predomina y, por lo tanto, el efecto de la tormenta en la región F2 domina el efecto de la tormenta en TEC, aunque otros efectos como la reducción de la plasmaesfera o los cambios de la ionosfera en la parte superior juegan un papel importante también (Lastovicka, J. [2002]). Durante una tormenta geomagnética, la ionosfera puede reaccionar subiendo a alturas mayores o cambiando su densidad de electrones, incluso por varios ordenes de magnitud. Este tipo de efectos, son más intensos en las regiones cercanas al ecuador magnético y a altas latitudes, aunque pueden ocurrir en cualquier parte del globo. Comunmente, el parámetro TEC o vTEC (proyección sobre la vertical del parámetro TEC) suele ser visto como una serie de tiempo en el caso de una estación o como un mapa global o regional en el caso de una red conjunta de estaciones. Este último caso es conocido como mapa TEC. La cadencia de los mismos depende del tipo de análisis que se desea.

Normalmente se construyen cada 10 minutos o incluso hasta cada 30 segundos, dependiendo del tipo de estudio que se desee.

En México ya existen trabajos de investigación previos sobre la ionosfera durante eventos solares ((Perez-Enriquez et al. [2010], Cipagauta-Lara E., [2007], López-Montes R., [2010], Ibarra Ortega H., [2016], Rodríguez M. M. et al., [2014], Sergeeva, M. A., Maltseva, O. A., Gonzalez-Esparza, J. A., De la Luz, V., & Corona-Romero, P. [2017], Sergeeva, M.A., Maltseva, O.A., Gonzalez-Esparza, J.A., Mejia-Ambriz, J.C., De la Luz, V., Corona-Romero, P., Gonzalez, L.X., Gatica-Acevedo, V.J., Romero-Hernandez, E., -Martinez, M. and Aguilar-Rodriguez, E., [2018], Ugalde-Calvillo L., [2017]). Ahora, el monitoreo de la ionosfera ha tomado una mayor relevancia en México desde la consolidación del Laboratorio Nacional de Clima Espacial y el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales en la UNAM. Estos dos laboratorios han despertado el interés de la población y dependencias gubernamentales sobre la importancia del monitoreo de la meteorología espacial, su impacto en diferentes sectores tecnológicos, sociales y por supuesto la investigación en este campo del conocimiento.

Como objetivo principal de este trabajo es analizar los cambios en el parámetro TEC durante las tormentas geomagnéticas intensas del Ciclo Solar 24 sobre territorio mexicano utilizando la base de datos del Servicio Sismológico Nacional. Como hipótesis, se considera que las perturbaciones ionosféricas intensas, observadas a latitudes mexicanas, pueden ocurrir durante la fase principal o de recuperación de las tormentas geomagnéticas intensas (según corresponda con el índice Dst). Se espera que durante estos periodos se observen picos dobles diurnos o múltiples en el parámetro $vTEC$. Debido a la anomalía ecuatorial, las estaciones GPS al sur de México detectan perturbaciones mayores que las estaciones al norte del país. Dichas perturbaciones pueden generar cambios significativos en el índice ionosférico W. Este índice W se aplica también a mapas en lo que se conoce como mapas de índice ionosférico W.

En ese mismo sentido, parte de la motivación de este trabajo es responder algunas preguntas básicas relacionadas a los efectos de las tormentas geomagnéticas intensas sobre la ionosfera: ¿Las tormentas geomagnéticas más intensas del ciclo solar 24 tuvieron algún efecto sobre México? Si la respuesta es sí, entonces ¿Que región fue la más afectada? ¿Cómo podemos cuantificar la perturbación del $vTEC$? ¿Es posible usar los mapas TEC como una herramienta confiable para estudiar el nivel de perturbación ionosférica? ¿Será el índice ionosférico W un buen indicador de la actividad sobre la ionosfera de México? La variación del parámetro TEC previo, durante y posterior a las tormentas geomagnéticas utilizando toda una red de estaciones distribuidas a lo largo y ancho del territorio nacional nos ofrecerá una buena oportunidad para poder responder estas preguntas, como pieza fundamental en este trabajo.

Con base en lo anterior, la tesis presentada está dividida en cinco capítulos. Partiendo con el primer capítulo, en donde se ofrece una descripción sobre el acoplamiento de la magnetósfera con la ionosfera. A la par, se describen los índices que caracterizan el estado del campo magnético como el Dst y el ionosférico W. Después, en el capítulo 2, se habla sobre la importancia de los sistemas globales de navegación por satélite y como estos proveen una técnica eficaz para el monitoreo de la ionosfera mediante el retraso de su señal en alguna región específica. Al llegar al capítulo 3, se explicará la metodología y los parámetros modificados dentro de las interfaces *gmagic* y *gplot*, mismas que fueron utilizadas para la obtención del Contenido Total de Electrones sobre México. En este mismo capítulo, se muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para la creación de los mapas TEC regionales, así como las estaciones sobre las cuales se hará el análisis en series de tiempo. Tanto los mapas como las series de tiempo TEC se obtienen para un periodo previo (una rotación solar) y durante la evolución de la tormenta. Lo anterior, con el propósito de diferenciar entre un estado quieto y uno perturbado y más allá, clasificar el grado de perturbación. Posteriormente, en el capítulo 4, se muestran los casos de estudio asociados a las tormentas geomagnéticas a analizar dentro del ciclo solar 24. Se menciona ligeramente la

causa solar de la tormenta así como las fulguraciones solares que ocurrieron en el momento en que el Sol se encontraba sobre México. Después, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los eventos seleccionados y su respectivo índice ionosférico W sobre varias estaciones. Finalmente, en el capítulo 5, se abre una discusión final sobre los resultados obtenidos y del trabajo a futuro que surge a partir de esta investigación.

MAGNETOSFERA-IONOSFERA

Este capítulo está enfocado a la descripción de tormentas geomagnéticas y su importancia en el estudio de la física espacial. Además de las características básicas de la ionosfera de bajas latitudes. A su vez, se hace una introducción al acoplamiento magnetosfera-ionosfera. Finalmente, se define el término de perturbación ionosférica y como éstas son cuantificadas a través de un índice ionosférico.

1.1 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

También llamado campo geomagnético, constituye la estructura tridimensional que forman las líneas de campo magnético intrínsecas de la Tierra (ver figura 1). Su origen es interno, a causa de las propiedades y movimientos del núcleo de la Tierra, el cual actúa como un dínamo generando corrientes eléctricas que a su vez generan un campo magnético. Está poblado principalmente por plasma térmico y partículas cargadas provenientes tanto del Sol como de la Tierra misma. En su forma más simple, puede ser representado como un imán. Sin embargo, la constante presión del viento solar juega un papel fundamental en su morfología (ver figura 1). Por otro lado, la magnetosfera (acuñado por T. Gold en 1959) es la región sobre la ionosfera en la que el campo magnético de la tierra controla los movimientos de las partículas cargadas. El campo magnético atrapa el plasma de baja energía y forma los cinturones de Van Allen, regiones en forma de toro en las que iones y electrones de alta energía (decenas de keV y más) se desplazan alrededor de la Tierra (Kivelson, M.G. and Bagenal, F., [2014]). Además, actúa como un escudo deflector del viento solar ya que sin éste, estas partículas barrerían la atmósfera del planeta (como en el caso de Venus o Marte). Durante el desvío de estas partículas, la presión dinámica del viento solar comprime constantemente las líneas de campo magnético en el lado día, mientras que del lado opuesto, se estiran y se alargan más allá incluso de la órbita de la Luna en lo que se conoce como magnetocola. Al ser un viento supersónico, se forma una onda de choque o *bow shock* que produce un aumento de densidad y temperatura por delante de él y reduce su velocidad hasta volverlo subsónico. Sin embargo, este escudo no es perfecto y una porción de las partículas logran penetrarlo a través de regiones de flujo llamadas cúspides polares (Kivelson, M. G. y Russell, C. T. [1996]). Las partículas atrapadas en estas regiones pueden moverse a lo largo de las líneas de campo magnético y depositar su energía sobre la atmósfera alta, para el ojo humano este espectáculo es conocido como auroras boreales o australes (dependiendo del hemisferio en el que se presenten).

Cercana a la Tierra, se encuentra una región de plasma de bajas energías llamado plasmaesfera, la cual co-rota alrededor de la Tierra en forma de toroide y se extiende hasta los $4 - 8 R_M$ (distancia entre la Tierra hacia la magnetopausa en dirección al Sol) vista desde el plano ecuatorial. Por arriba de estos valores la densidad del plasma decrece abruptamente en lo que se conoce como plasmapausa, es decir, la frontera entre el plasma co-rotante con la Tierra y el plasma influenciado por los campos eléctricos magnetosféricos (Schunk R. and Nagy A. [2009]). De esta forma se conectan eléctricamente la ionosfera con el campo geomagnético, causando un intercambio o acoplamiento de energía y momento entre ambas regiones.

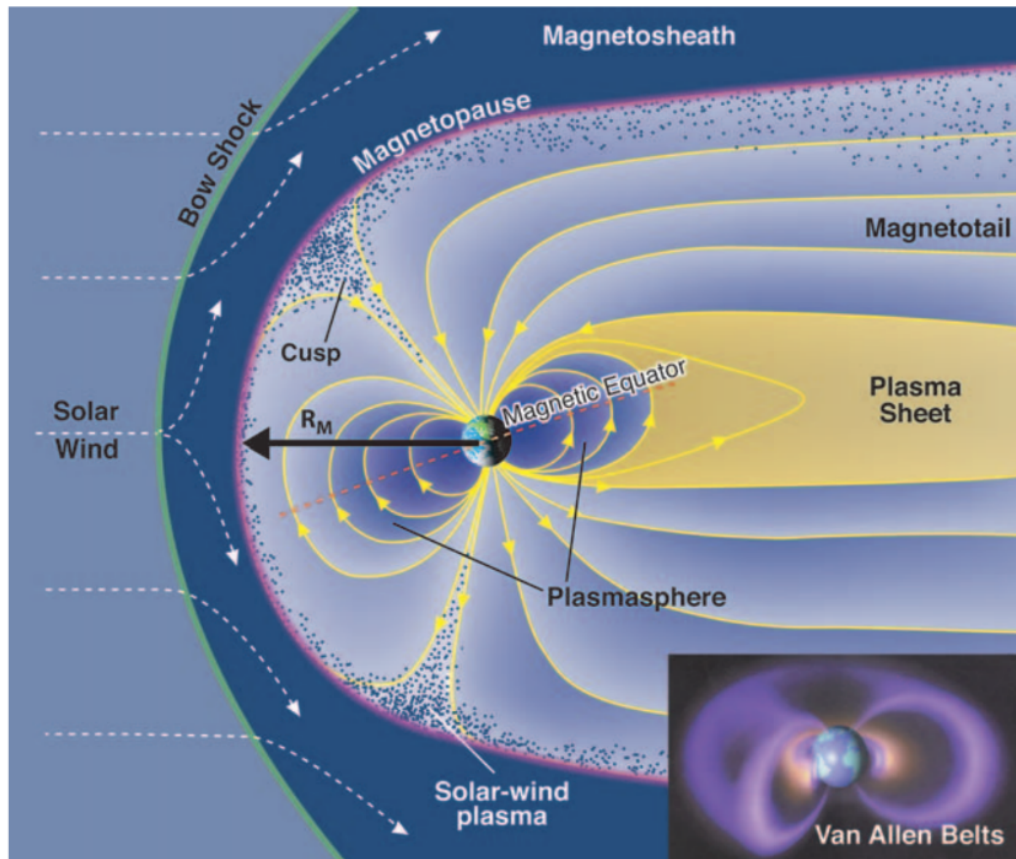


Fig. 1: Esquemización de la magnetosfera deformada por la acción del viento solar. Tomado de: [Kivelson, M.G. and Bagenal, F., \[2014\]](#).

1.2 TORMENTAS GEOMAGNETICAS

Se le conoce como tormenta geomagnética al incremento de energía contenido por los anillos de corriente. Estas son provocadas por las condiciones del viento solar sobre la magnetosfera. Su ocurrencia está ligada con la actividad solar.

El ingrediente principal para generar una tormenta es el campo magnético interplanetario (IMF en inglés) dentro del viento solar, el cual debe ser intenso y continuamente apuntando al sur durante varias horas ([Russell et al., \[1974\]](#)). Para poder determinar el grado de intensidad de estas tormentas es necesario caracterizarlas por medio de un índice.

1.3 ÍNDICE GEOMAGNÉTICO DST

El índice Dst o Disturbance Storm Time por sus siglas en inglés, es un índice de actividad geomagnética implementado para cuantificar la variación de la componente horizontal H del campo geomagnético. Esta variación es medida por una red de observatorios cercanos a la región ecuatorial a través de mediciones en la intensidad de las corrientes ecuatoriales conocidas como anillos de corriente. Los cuatro observatorios encargados de colaborar conjuntamente en la caracterización de este índice son: Hermanus en el Sur de África, Honolulu y San Juan ambos en Estados Unidos y por último Kakioka en Japón.

Los cambios en los niveles del Dst están relacionados principalmente a procesos como: la inyección y disipación de energía en el anillo de corriente y el aumento en la densidad de líneas de campo. Estos cambios delatan la presencia de una tormenta geomagnética que no es más que

la variación temporal de la magnetosfera por acción del Campo Magnético Interplanetario. La componente B_z sur de este campo (desde el sistema de coordenadas terrestre) de larga duración ($B_z \sim -10 \text{ nT}$ y $\Delta t \sim 3 \text{ hrs}$) permite una mayor transferencia de energía efectiva entre el viento solar y la magnetosfera terrestre a través de la reconexión magnética (Mayaud P. [1980]).

Una tormenta geomagnética generalmente está compuesta de tres fases consecutivas (Gonzalez, W. D. et. al., [1994]): la primera es la *fase inicial*, que es el resultado de la compresión de la magnetosfera a causa de discontinuidades en el viento solar (CMEs o CIRs). Su duración va de 2 a 8 horas, breve, comparada con las otras dos fases. En esta fase los valores del índice Dst se incrementan ya sea gradual o abruptamente. A este último caso se le conoce como *comienzo repentino de la tormenta* o *Sudden Storm Commencement* en inglés (SSC). Después, los niveles de Dst comienzan a descender hasta llegar a valores negativos, típicamente a menos de -100 nT , en lo que se conoce como *fase principal* o *main phase* en inglés. Esta disminución ocurre debido a la componente B_z sur de la tormenta magnética, que permite el acoplamiento del viento solar y la magnetosfera. Como resultado, la corriente del anillo se intensifica, la cual tiene una dirección hacia el oeste y que circula alrededor de la Tierra en las latitudes ecuatoriales. Lo anterior, induce un campo magnético horizontal H con dirección sur contrario al del dipolo terrestre, esta combinación da como resultado el decaimiento de los valores Dst a negativos durante la fase principal de la tormenta. Durante la tercera y última fase, la *fase de recuperación* o *recovery phase*, el campo magnético comienza a recuperarse, es decir, los valores incrementan gradualmente hasta ser cercanos a cero. Esta fase es la más lenta de todas, puede llegar a durar varios días. La recuperación de la magnetosfera se explica por la disminución y pérdida del exceso de partículas en el anillo de corriente (Kamide, Y. et. al., [1998]). La figura 2 ilustra las tres fases antes descritas.

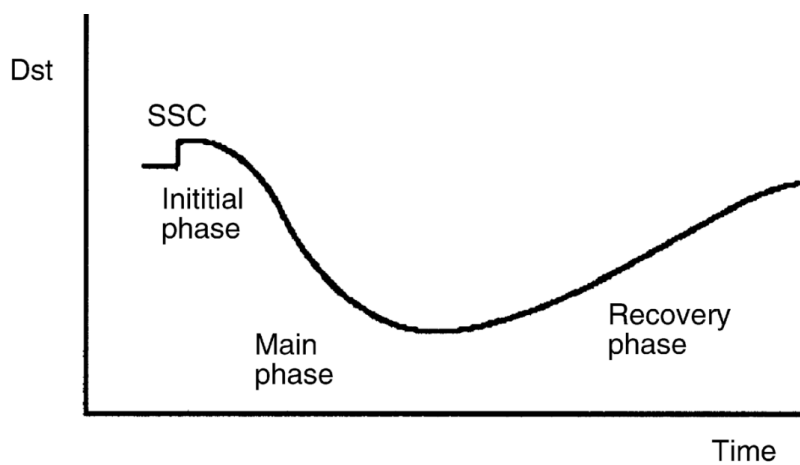


Fig. 2: Esquematización de las tres fases de una tormenta geomagnética a través del índice Dst. Tomado de: Kamide, Y. et. al., [1998].

Usando el valor mínimo Dst durante el desarrollo de una tormenta geomagnética es posible clasificar a esta a través de umbrales como lo muestra la tabla 1.

Durante el paso de una tormenta geomagnética se pueden producir cambios en la concentración de electrones libres en la atmósfera (incremento o decremento) en una escala local o global. Para el clima espacial, las variaciones de estos parámetros son muy importante, ya que la atmósfera ionizada de la Tierra funciona como un medio de propagación para las ondas con frecuencias utilizadas en la comunicación a nivel terrestre (frecuencias altas HF) o satelitales (frecuencias muy altas VHF).

Tipo de TG	Valor del índice Dst [nT]
Quieta	$Dst > -30$
Débil	$-50 < Dst \leq -30$
Moderada	$-100 < Dst \leq -50$
Intensa	$Dst \leq -100$

Tabla 1: Clasificación de una tormenta geomagnética con base en el valor mínimo del índice Dst. Referencia: [Sugiura, M., and S. Chapman \[1960\]](#).

1.4 IONOSFERA TERRESTRE

Los elementos clave básicos para entender el origen y dinámica de la ionosfera terrestre pueden ser reducidos a dos: una atmósfera neutra y una fuente de ionización para los gases presentes en esa región. La atmósfera de la Tierra es como una envoltura de gases y partículas que disminuye su densidad y temperatura en relación a la altura, hasta alcanzar el espacio interplanetario. Considerando la variación de temperatura, se divide en cuatro extensas regiones a partir del nivel del mar: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

Comunmente se le conoce como ionosfera terrestre a la región atmosférica parcialmente ionizada. Se caracteriza por la presencia de especies iónicas o radicales libres (O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2 y electrones libres). Los procesos físicos principales para la formación de este plasma son la ionización y la recombinación. El primer término es básicamente cuando un átomo o una molécula adquiere una carga negativa o positiva al ganar o perder electrones, a menudo junto con otros cambios químicos. El átomo o molécula cargada eléctricamente resultante se llama ion. De manera inversa, la recombinación es la unión del electrón y el ión para formar de nuevo una molécula neutra. Ambos procesos aumentan o decrecientan la densidad de electrones en la ionosfera dependiendo de las condiciones químicas y espaciales de la Tierra como la inclinación de su eje de rotación, traslación y de las condiciones externas como el viento solar, el medio interplanetario y las regiones activas en la superficie solar. La gráfica 3 muestra el punto de equilibrio entre la radiación ionizante y la densidad atmosférica los cuales forman una primera aproximación a la concentración de iones libres. El perfil ionosférico, donde la tasa de iones máxima se encuentra aproximadamente entre los 350 km de altura.

1.5 REGIONES Y CAPAS IONOSFERICAS

La estructura ionosférica está sujeta a diferentes aspectos tanto temporales como espaciales, como son las estaciones anuales o la latitud y longitud geográfica de la región. Además, sus niveles de densidad están relacionados directamente a fenómenos solares, por ejemplo, flujo de radiación, número de manchas y a otras tantas esporádicas como las fulguraciones solares o *flares* y las Eyecciones de Masa Coronal. En general, mantiene relativamente su forma aún a pesar de los diferentes procesos físicos que dominan a las diferentes latitudes. Este perfil se compone de varias regiones estratificadas una con la otra y nombradas (de menor a mayor altura) como D, E y F. A su vez, los máximos locales de densidad (Nm) de electrones también llamadas capas. A continuación se describen brevemente cada una de estas regiones y sus respectivas capas.

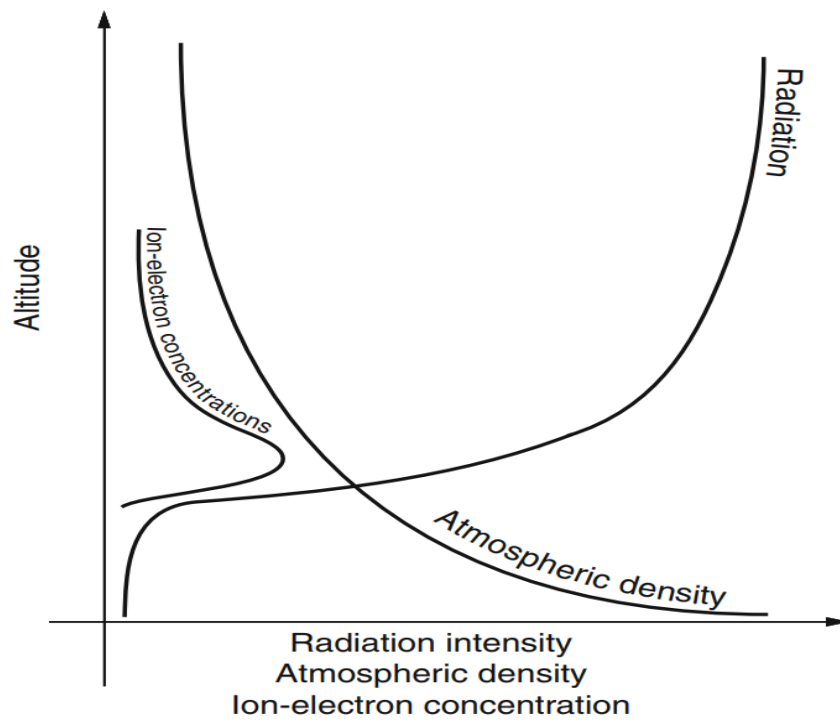


Fig. 3: Representación esquemática de la formación de las capas ionizadas en la atmósfera. Tomado de: [Bohm, J. and Schuh, H., \[2013\]](#).

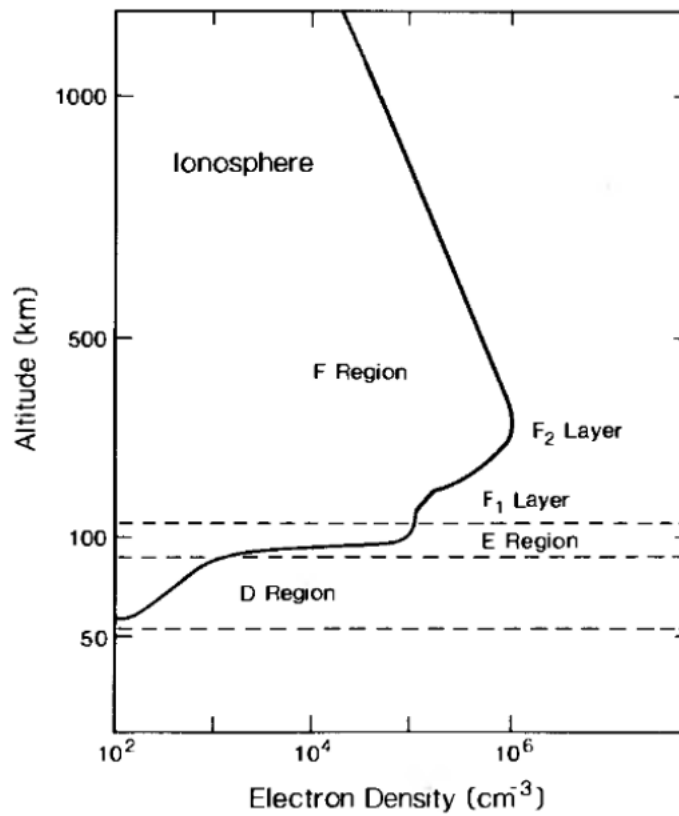


Fig. 4: Regiones y capas de la ionosfera dadas por la densidad de electrones por centímetro cúbico. Tomado de: [Kivelson, M. G. y Russell, C. T. \[1996\]](#).

1.5.1 Región D

Comenzando desde la ionosfera baja se encuentra la región D. Tradicionalmente, se define como una pequeña parte de la ionosfera entre los 50-100 km de altura que tiene por debajo a la estratosfera no ionizada y por arriba al denso plasma. Tiene una densidad máxima de electrones durante el día de $NmD = 10^3 \text{ cm}^3$ a 85 km de altura aproximadamente, eso es cien veces menor a la densidad máxima en la región E y entre quinientas y mil veces menor al máximo de la región F. A diferencia de las regiones más altas, existe una mayor cantidad de iones negativos. La luz ultravioleta proveniente del Sol (Mitra A. P. [1951]), los rayos X sobre los gases O_2 y N_2 así como la radiación Lyman $-\alpha$ ($\lambda = 1216 \text{ \AA}$) sobre el óxido nítrico NO son la fuente principal de ionización (Prolss, G. W. [1991]) que logra penetrar hasta estas profundidades. Sin embargo, la tasa de recombinación es alta, por lo que el efecto neto de ionización es bajo. Esto explica su desaparición durante la noche. En términos de comunicaciones, juega un papel fundamental en la propagación de ondas de radio por debajo de los 30 MHz.

1.5.2 Región E

Es la porción de la ionosfera cuya frontera baja desde los 90 km y se extiende hasta los 170 km de altura. Tiene un máximo de ionización de $NmE = 10^5 \text{ cm}^3$ conocida como capa E a 110, km de altura. Sus principales componentes son los iones O_2^+ y NO^+ . A diferencia de la región D, esta permanece durante la noche con una leve densidad de electrones ($5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$) comparada con la del día (10^{11} m^{-3}). La morfología de la capa E se ve influenciada en cierta medida por las corrientes horizontales que fluyen en ella a través del campo geomagnético horizontal y por los efectos competitivos entre la tasa de ionización y recombinación. Además, dentro de esta misma región aparece la *capa esporádica* o E_s producida por eventos solares intensos (Prolss, G. W. [1991]).

1.5.3 Región F

Se puede definir como la región de la ionosfera por arriba de los 150 km donde el componente principal de ionización es el ión de oxígeno atómico O^+ originado por la radiación solar del extremo ultravioleta (10 – 100 nm). A diferencia de la región D, esta tiene dos máximos locales de densidad durante el día conocidos como capa F1 y F2 entre 150 – 200 km y 200 – 500 km de altura, respectivamente. Durante la noche, la tasa de ionización baja y estas dos capas se vuelven la misma capa F2. Esta última se caracteriza por ser la capa con mayor densidad de electrones ($NmF2 = 10^6$). Además, es la capa mas importante desde el punto de vista de la navegación. Es también la más variable y difícil de predecir (Prolss, G. W. [1991]). A mayores alturas, la densidad de electrones decrece exponencialmente en lo que se conoce como ionosfera alta.

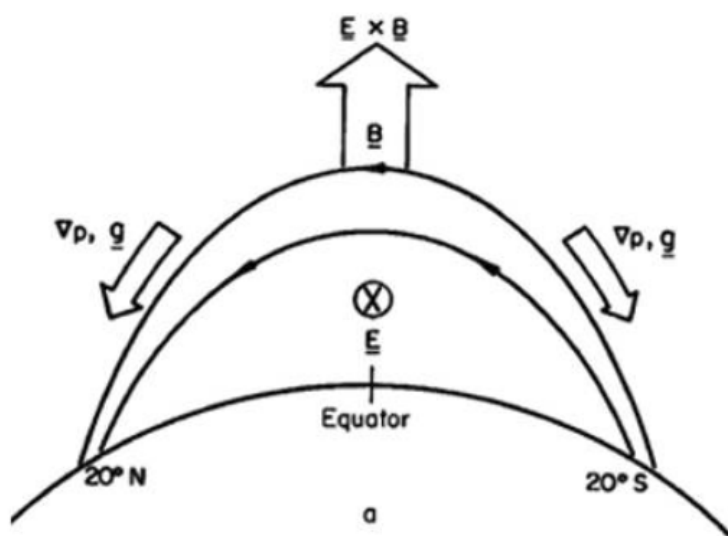


Fig. 5: Efecto fuente que eleva el plasma ionosférico a mayores alturas a causa del movimiento del campo eléctrico perpendicular al magnético ($E \times B$), la gravedad (g) y gradientes de presión (∇p). Tomado de: Kelley M. C. [1989].

En el caso de la ionosfera de latitudes bajas, la región F está dominada por la anomalía ecuatorial de Appleton. Lo anterior se explica a partir del efecto entre la dirección del campo eléctrico ecuatorial y el campo magnético que producen una deriva $E \times B$ durante el día. Después de que el plasma se levanta a mayores alturas, puede difundirse hacia abajo a lo largo de las líneas del campo magnético bajo la influencia de la gravedad y las fuerzas del gradiente de presión. El resultado neto es la formación del efecto fuente (ver figura 5), que mueve la ionización desde el ecuador hacia las dos crestas que se encuentran a cada lado del ecuador a aproximadamente $\pm 20^\circ$ de latitud magnética.

Las variaciones en la estructura de la ionosfera afectan directamente a la propagación de las ondas, por ello es importante conocer su comportamiento y origen. A continuación una descripción breve de estas variaciones:

1.6 VARIACIONES REGULARES

Las variaciones regulares dependen de la ubicación geográfica y geomagnética de la región. Por ejemplo, a latitudes medias los niveles de densidad son bajos (comparadas con latitudes cercanas al Ecuador) y en las regiones de latitudes altas, aurorales y ecuatoriales son altamente irregulares. Las causas principales son debido a la cantidad de radiación solar debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra en su movimiento del Sol. En ese sentido, existen algunas variaciones con cierta periodicidad. A lo anterior se le conoce como variaciones regulares. A continuación se describen brevemente cada una de estas variaciones.

1.6.1 Variación Diurna

La de mayor frecuencia sin duda es la variación diurna marcada por el movimiento de rotación de la Tierra donde parte de la superficie terrestre entra y sale de la luz del Sol. Esta variación aunque también afecta a latitudes altas, tiene un impacto más notorio a latitudes bajas. Los dos cambios notables en la densidad de electrones están dados por los procesos de fotoionización y recombinación, es decir, la puesta de Sol y el atardecer respectivamente. La ionización en las

regiones D y E dependen de la radiación solar a lo largo del ciclo solar y del ángulo cenital sobre la región, alcanzando el máximo valor de densidad cerca del medio día cuando el ángulo cenital solar es más pequeño. Después de esto, a media noche, la densidad de electrones es menor debido a la ausencia de foto-ionización (Schunk R. and Nagy A. [2009]).

1.6.2 Variación Estacional

La variación estacional está relacionada a los movimientos de nuestro planeta en su órbita alrededor del Sol. Para entender mejor, hay que tener presente que en el transcurso de un año, la declinación del Sol, es decir, el ángulo entre el Sol y el ecuador celeste (proyección del ecuador de la Tierra en la esfera celeste) varía entre $+23.5$ y -23.5 grados. Esta inclinación tiene una incidencia directa en la cantidad de luz solar que recibe el planeta, y básicamente, es responsable de originar las distintas estaciones a lo largo del año. Durante el verano, cuando el ángulo de los rayos del Sol con respecto al cenit es mayor, la densidad de ionización aumenta en las capas D, E y F1 mientras que en invierno, la densidad disminuye. La capa F2, a diferencia de las otras tres, tiene una mayor ionización durante el invierno y menor durante el verano. Este fenómeno es conocido como *anomalía estacional*, que ocurre debido a cambios en la composición de la atmósfera neutra O/N₂. Lo anterior se muestra en la figura 6 durante un año. Otro factor puede ser el levantamiento del plasma ecuatorial hacia latitudes altas en ambas partes del ecuador magnético (Zou et. al., [2000]).

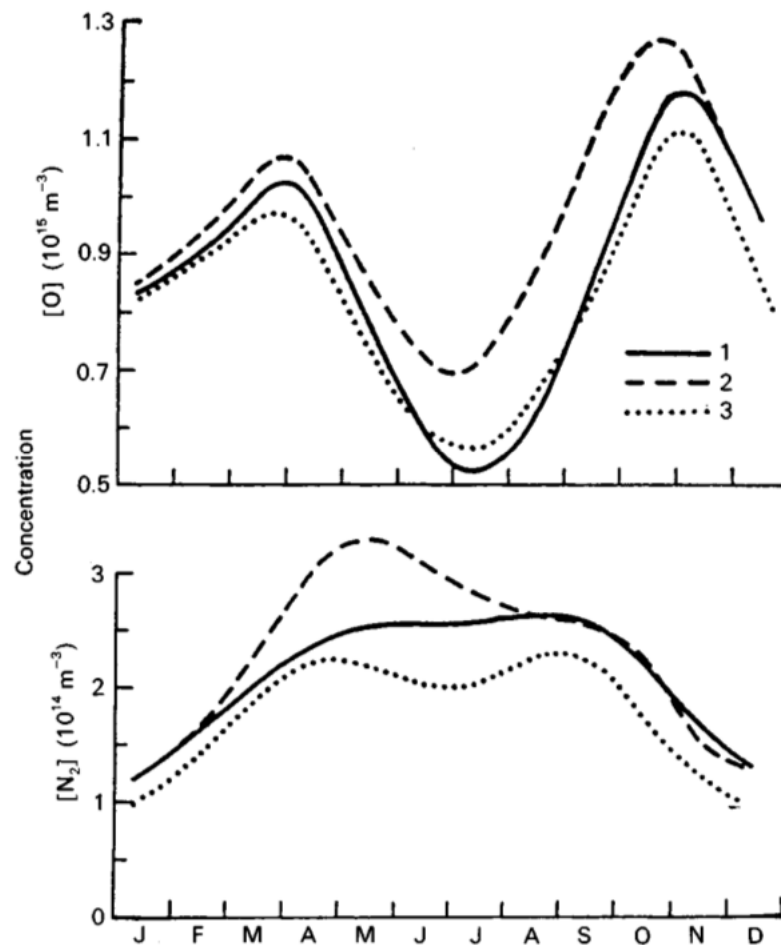


Fig. 6: Variación a lo largo del año de las concentraciones de oxígeno y nitrógeno a 300 km de altura a latitudes medias de acuerdo a tres modelos diferentes. Tomada de: Hargreaves, J.K., [1992]

1.6.3 Variación con la Rotación del Sol

Como su nombre lo dice, está ligada al movimiento de rotación del propio Sol. Este tiene un periodo de 27 días, con respecto a un observador sobre la Tierra. El flujo de radiación en el EUV emitido por las manchas solares sobre la superficie visible solar son la causa principal de esta variación en la densidad de ionización, sobretodo en la parte superior de la ionosfera. Esta modulación aunque puede llegar a ser muy baja, afecta de manera global y local a diferentes latitudes (Liu L. et al., [2009]).

1.6.4 Variación con el Ciclo Solar

En este caso, las variaciones del ciclo solar se deben al cambio en los flujos de radiación del EUV y los rayos X. Estos a su vez están relacionados directamente con el ciclo de manchas solares, es decir, al periodo entre dos etapas de mínimas manchas solares. Estos ciclos tienen un periodo de duración de aproximadamente 11 años y están directamente relacionadas con la actividad solar. Durante la fase del mínimo solar (pocas o nulas manchas solares) la densidad de ionización sobre todas las regiones ionosfericas es menor que durante la fase de máxima actividad solar (máximo de manchas solares) (Zou et. al., [2000]).

La gráfica 7 muestra, en el panel superior, la variación del número de manchas solares desde 1931 hasta poco antes de 1991. Al mismo tiempo, en el panel inferior se observan las variaciones de las frecuencias críticas foE, foF1 y foF2 relacionadas a los máximos de densidad para las capas E, F1 y F2 respectivamente. La relación entre ambas series es evidente y concuerda también con la variación estacional.

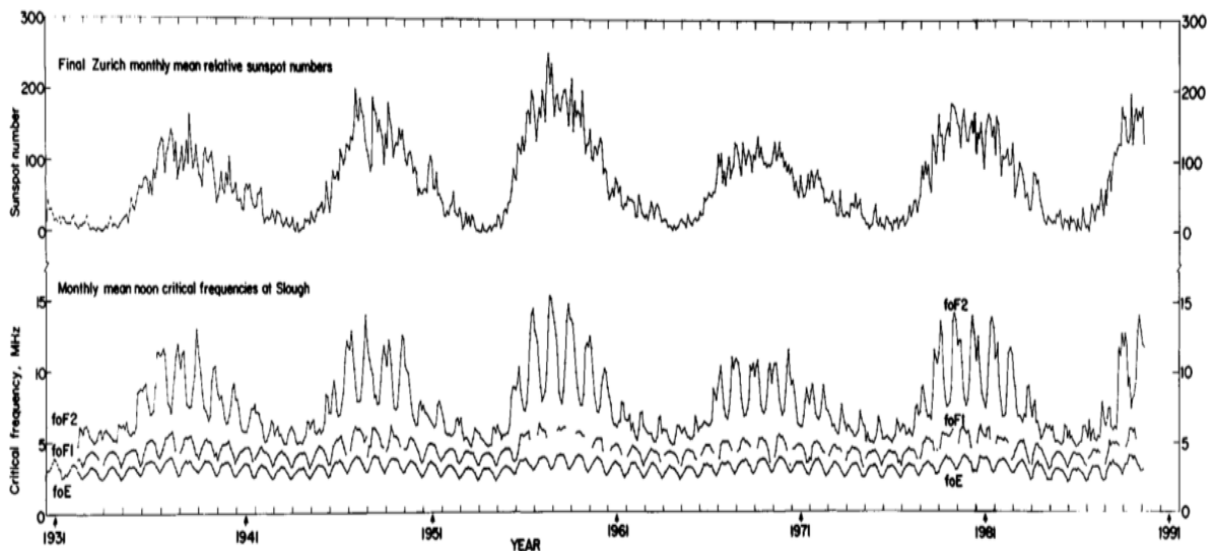


Fig. 7: Variación de las frecuencias críticas a lo largo de diferentes ciclos de manchas solares. Notesé además la variación estacional sobre todo en la frecuencia F2. Tomado de: Hargreaves, J.K., [1992]

1.7 VARIACIONES IRREGULARES

A diferencia de las anteriores, las variaciones irregulares son provocadas por la actividad impredecible del Sol. Las fulguraciones solares tienden a ocurrir cuando el Sol está más activo. Esto tiene consecuencias directas en la ionosfera. En 1937, J. H. Dellinger reconoció que los desvanecimientos o *fadeouts* en la propagación de radio a alta frecuencia debido a la fuerte absorción

al mismo tiempo que una intensa fulguración solar ocurría (Hargreaves, J.K., [1992]). Además de las fulguraciones, el arribo de las Eyecciones de Masa Coronal al ambiente terrestre afecta de manera directa e indirecta a la densidad de electrones libres en la ionosfera en todas las latitudes.

1.7.1 *Perturbación Ionosférica*

En el caso de la ionosfera se le conoce como perturbación al cambio en la densidad de electrones. Básicamente, los cambios por arriba y por debajo del valor esperado son llamados perturbaciones positivas y negativas, respectivamente. Estos cambios pueden estar asociados a cambios en la velocidad del viento termosférico o en la composición del gas neutro (Prolss, G. W. [1991]).

Para establecer una forma de cuantificar la perturbación, es a través de un índice. Por ejemplo, el índice delta δ se utiliza para calcular la desviación del valor $vTEC$ o proyección vertical del Contenido Total de Electrones (ver página 25), y se define de la forma:

$$\delta = \frac{vTEC_{\text{máx}} - \langle vTEC \rangle}{\langle vTEC \rangle},$$

donde $vTEC_{\text{máx}}$ significa el valor máximo TEC y $\delta \geq 4$ representa un estado perturbado de la ionosfera (Rodríguez M. M. et al., [2014]). Sin embargo, para este trabajo se utilizará la mediana TEC y no el promedio. Así mismo, existen otros índices ionosféricos como el W del cual se hablará más adelante.

1.7.2 *Doble Máximo Diurno o DDM*

El patrón DDM comúnmente encontrado a latitudes medias y bajas representa la morfología de doble acrecentamiento durante el día. Pueden ocurrir durante tormentas o subtormentas geomagnéticas (Pi, X., et. al., [1993]). Estos patrones de perturbación ionosférica están estrechamente relacionados con las fases de inicio y recuperación de las subtormentas que se muestran tanto en los electrojets aurorales como en el anillo de corriente. En el caso del cálculo del TEC (ver figura 8), algunos estudios han demostrado que los dobles picos diurnos se deben a un efecto combinado de movimientos verticales y procesos de pérdida química dependientes de la altitud.

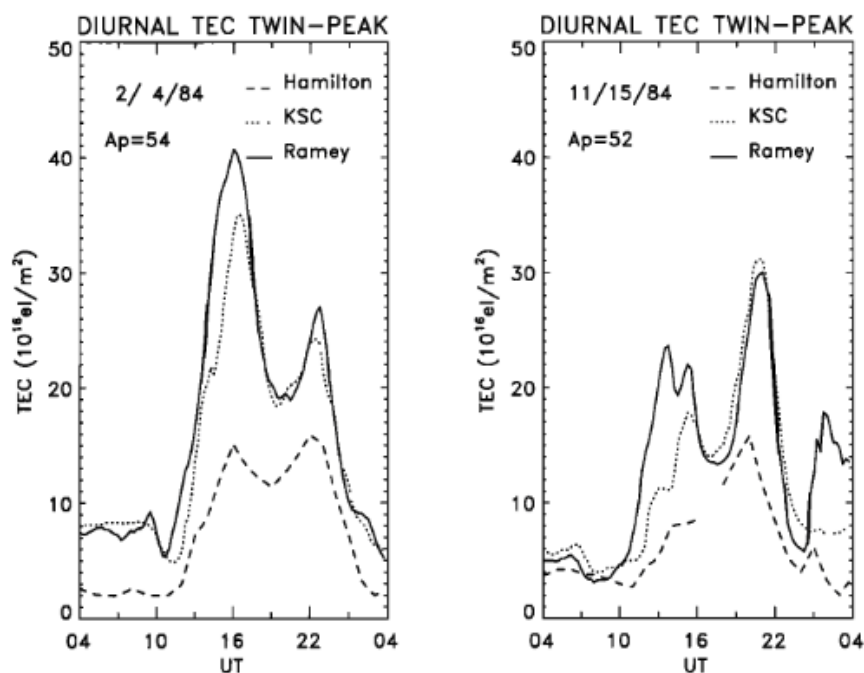


Fig. 8: Patrón de Doble Máximo de densidad TEC Diurno observado a latitudes medias (panel izquierdo) y bajas (panel derecho) durante el 4 de febrero y 15 de noviembre de 1984. Tomadas de: Pi, X., et al., [1993]

A través de un análisis estadístico, se determinaron los siguientes criterios para identificar los DDM: 1) Que el tiempo de ocurrencia, para el primer pico sea después de las 09:00 horas; mientras que el segundo ocurra antes de las 20:00 horas, ambos en tiempo local LT, 2) que la magnitud para cada pico de densidad satisfaga la siguiente desigualdad:

$$\frac{\text{TEC}(\text{peak}) - \text{TEC}(\text{trough})}{\text{TEC}(\text{peak})} \times 100 \geq 8\%,$$

donde TEC(peak) hace referencia a uno de los picos en la variación diurna y TEC(trough) el valor mínimo TEC entre los dos picos diurnos. Además, el primer criterio establece la naturaleza diurna del fenómeno, teniendo en cuenta los tiempos relativamente tardíos de la puesta de sol durante los meses de verano. El segundo criterio proviene de la consideración de que cada pico debe tener un valor significativamente superior al mínimo entre los picos (Pi, X., et al., [1993]). Con base en la anterior ecuación, se calcularon los umbrales en porcentajes de estos doubles picos consistentes con más del 8% propuestos en este trabajo para que sean considerados como doubles picos.

1.8 INDICE IONOSFERICO W

El propósito de este índice es definir la tormenta en términos del parámetro TEC, mediante un análisis cuantitativo. Este índice no tiene restricciones en cuanto a los lugares en los que puede ser aplicado. La definición matemática de este índice, está dada por la siguiente ecuación:

$$W = \log\left(\frac{Y}{Y_{med}}\right)$$

La variable Y puede representar ya sea la densidad máxima de la capa F2 (NmF2) o el máximo valor TEC. Mientras que Y_{med} es la mediana estimada para el mismo parámetro que representa

el estado quieto durante un periodo de tiempo específico (una rotación solar a 27 días). La correlación de este índice ionosférico con los fenómenos solares observables es profunda, ya que han existido tormentas ionosféricas bajo condiciones geomagnéticas quietas ([Stanislawski, I., & Gulyaeva, T. \[2015\]](#)).

Este cociente nos permite hacer una clasificación en cuatro niveles asignados por el valor específico Dlog de acuerdo a la siguiente tabla:

Estado Ionosferico	Índice W	DTEC = $\log(Y/Y_{med})$
Perturbación intensa	+4	$0.301 < DTEC$
Perturbación moderada	+3	$0.155 < DTEC \leq 0.301$
Perturbación débil	+2	$0.046 < DTEC \leq 0.155$
Quieto	+1	$0 < DTEC \leq 0.046$
Quieto	-1	$-0.046 \leq DTEC \leq 0$
Perturbación débil	-2	$-0.155 \leq DTEC < -0.046$
Perturbación moderada	-3	$-0.301 \leq DTEC < -0.155$
Perturbación intensa	-4	$DTEC < -0.301$

Tabla 2: Estado de la ionosfera según el índice ionosferico W. El signo (+) en W indica un incremento y el signo (-) una reducción. Referencia: [Gulyaeva, T. L., and I. Stanislawski \[2008\]](#)

Los criterios para definir los intervalos de esta clasificación están basados en la evaluación convencional de la desviación negativa foF2 ionosférica, siendo [0, 10 %] para un día quieto, [10, 30 %] para una perturbación moderada, [30, 50 %] para una tormenta ionosférica y un agotamiento de foF2 mayor que 50 % para condiciones extremas o anómalas ([Gulyaeva, T. L., Stanislawski, I., & Tomasik, M. \[2008\]](#)). Además, el signo de Dlog nos da información sobre el paso de la fase positiva o negativa de la perturbación ionosférica.

Tanto el índice magnetosférico Dst, como el índice W serán implementados posteriormente para el estudio de los efectos de una tormenta geomagnética sobre la densidad ionosferica dentro del territorio mexicano.

MONITOREO DE LA IONOSFERA USANDO GNSS

En este capítulo se introduce la teoría básica detrás de los sistemas de navegación por satélite. Se explica además, cómo la densidad de la ionosfera puede ser aproximada por el retraso de la señal que emite un satélite en el espacio hacia un receptor en tierra. La proyección de este valor en varios puntos de la ionosfera a medida que los satélites viajan sobre el campo de visión de los receptores, ayuda a conocer el estado del plasma ionosférico sobre una región. Por ello, es necesario conocer el funcionamiento de los componentes principales de los sistemas de posicionamiento global y el formato de los archivos que se manejan.

2.1 SISTEMAS GNSS PARA EL MONITOREO DE LA IONOSFERA

Se le conoce como GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite por su acrónimo en inglés) al conjunto de sistemas satelitales como: GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de los Estados Unidos, GLONASS de Rusia, Galileo de Europa y Beidou (o COMPASS) de China y otros sistemas satelitales de navegación regionales (Galileo y Beidou aún en fase de despliegue a la fecha que se escribe este trabajo). En general, todos estos sistemas proveen de una alta precisión espacial de forma continua en tiempo casi real. Para ello, utilizan la técnica de espectro disperso (CDMA) en la banda de radiofrecuencias (1 ~ 2 GHz). En las siguientes secciones se hablará en detalle sobre la teoría de esta técnica, sus aplicaciones en el monitoreo de la ionosfera para finalmente hablar sobre la importancia de estos sistemas con los efectos durante un evento de clima espacial.

Para hablar sobre cualquiera de estos sistemas de navegación y sus características es necesario conocer primero la estructura global de los mismos, la cual se divide por segmentos como lo muestra la figura 9. En general, son tres: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuarios. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

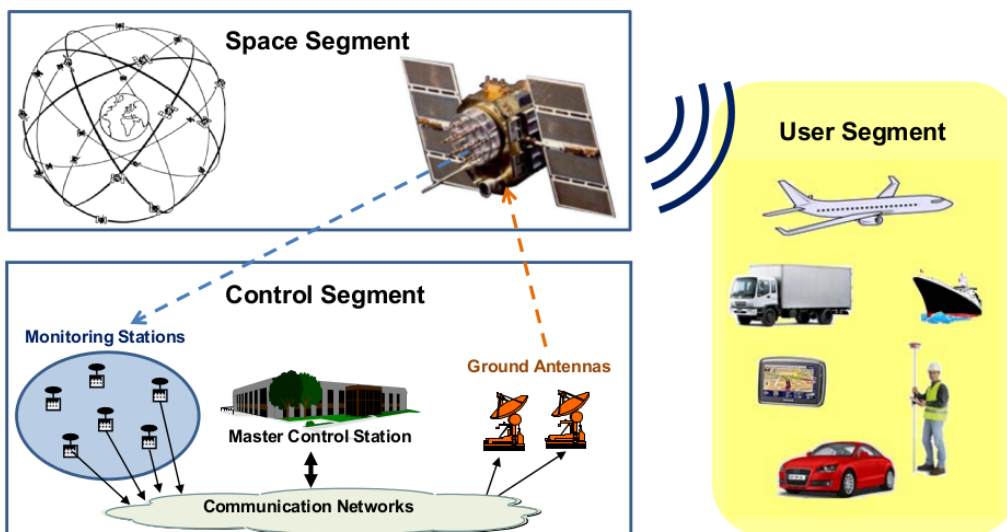


Fig. 9: Constitución de un sistema de navegación por satélite. Tomado de: [Subirana, J. S. et. al., \[2013\]](#).

2.1.1 Segmento espacial

Dentro de este segmento se encuentran todos los satélites GNSS que orbitan alrededor de la Tierra. Los hay de dos tipos: de constelaciones primarias y complementarios, respectivamente. Los primeros están distribuidos en diferentes planos orbitando alrededor de la Tierra formando constelaciones, garantizando así, la cantidad necesaria de satélites en vista hacia los receptores para poder calcular el posicionamiento. Los segundos, se encargan de hacer las correcciones en los errores de posicionamiento y forman parte de los sistemas de aumentación (ver tabla 3).

El tipo de órbita en los satélites de comunicación está dado por el ángulo de su plano orbital i con respecto al plano de la eclíptica, como lo muestra la figura 10 y de la siguiente forma: órbita en el plano ecuatorial si $i = 0^\circ$, órbita en el plano polar si $i = 90^\circ$ y órbita en plano inclinado si $0^\circ < i < 90^\circ$. Cabe mencionar que por la altura a la que viajan los satélites (ver tabla 3) su velocidad es cercana a los 14,000 km/hr y tienen un periodo orbital de 12 horas, aproximadamente.

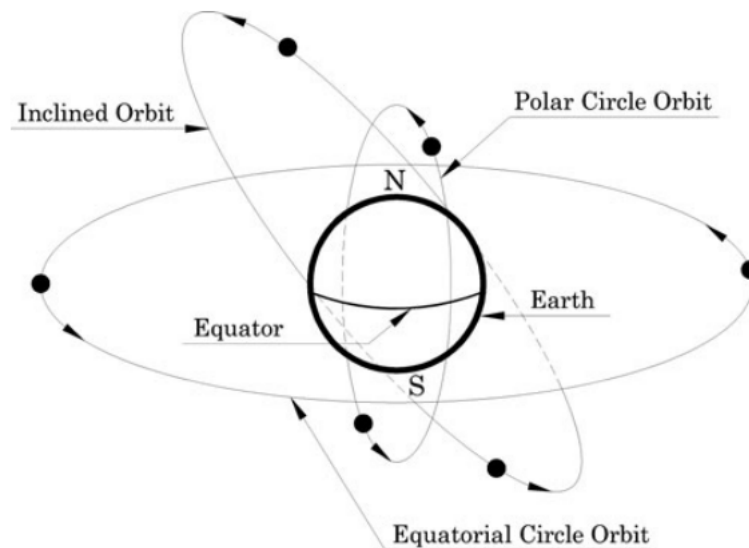


Fig. 10: Tipos de órbitas de los satélites con respecto a la eclíptica. Tomado de: [Ghasemi, A., Abedi, A., & Ghasemi, F. \[2013\]](#).

Cada uno de estos satélites tiene la capacidad para enviar un conjunto de señales (aunque para efectos prácticos se hará referencia a este conjunto como la señal) que los identifica, una estampa de tiempo, los parámetros de su órbita y su posición. A lo anterior se le conoce como efemerides.

Algunas de las características básicas de los sistemas (hasta la fecha) son los siguientes:

2.1.2 Segmento de control

Este segmento se compone de una red de estaciones fijas distribuidas alrededor del mundo. Existen estaciones de control, de monitoreo de los satélites y estaciones de carga de datos. En el caso del GPS, existen dos estaciones de control maestras (una primaria y la segunda de respaldo), cuatro estaciones de carga de datos y diez más de monitoreo continuo. Como su nombre lo dice, las estaciones de monitoreo se encargan de recibir la señal de los satélites y la retransmiten a las estaciones de control. Después de analizar y reajustar sus órbitas por el centro de procesamiento, se envían sus efemerides corregidas a las estaciones de carga de datos. Finalmente, las estaciones de carga de datos son las únicas que pueden enviar esta información hasta los satélites.

	GPS	GLONASS
Número de satélites	31	27
Satélites por plano orbital	6	3
Radio de órbita (km)	26,000	25,000
Periodo de órbita	11h56m	11h15m
Fases portadoras	L1:1575.42 MHz L2:1227.60 MHz	L1:1602.56 – 1615.5 MHz L2:246.43 – 1256.5 MHz

Tabla 3: Algunos parámetros de las constelaciones GPS, Galileo y GLONASS. Tomado de: [Awange, J.L., \[2018\]](#)

La distribución de las estaciones de control en tierra garantizan que cada satélite sea visible por lo menos desde tres estaciones de monitoreo, lo cual permite un cálculo preciso de sus órbitas.

2.1.3 Segmento de usuarios

El último de los segmentos es el segmento de usuarios que engloba a todos los equipos que captan y procesan la señal proveniente del segmento espacial. Las aplicaciones derivadas del procesamiento de la posición y tiempo de los satélites forman parte de este segmento. De aquí se derivan las propiedades intelectuales de cada empresa o institución desarrolla una gama amplia de aplicaciones. Las más comunes, por ejemplo, transporte en todas sus modalidades, agronomía, industria de la construcción, investigación científica (geodesia), entre otras.

Más adelante, se describirá cómo el retraso de la señal GPS en particular permite aproximar la densidad de la atmósfera alta. En ese sentido, esta investigación cae dentro del segmento de usuarios, al ser una aplicación científica que procesa los datos GPS y desarrolla un producto final útil para el público.

En los últimos años, el segmento de usuarios ha tenido una evolución y una aplicabilidad importante en todos los sectores. Hoy en día, es posible captar y procesar la señal de uno o varios satélites de varios tipos de constelaciones a la vez, lo que permite obtener un posicionamiento preciso.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Para entender como un receptor es capaz de obtener su posición de una manera precisa es necesario seguir el camino que recorre la señal desde que es enviada por el satélite hasta que los usuarios desarrollan aplicaciones con esta información.

Paso 1 - Satélites. Como se mencionó previamente, cada satélite conoce las efemérides de su órbita y su estampa de tiempo con una precisión muy alta (los satélites GPS llevan relojes de rubidio con precisión de 10^{11}) o también llamado mensaje de navegación. Cualquier error en estos parámetros puede ser corregido por las estaciones de control en tierra. Además, cada satélite tiene su propio código con el cual se identifica y diferencia de los demás satélites, también llamado *Pseudorandom Noise* (PRN).

Paso 2 - Propagación. La señal emitida por los satélites viaja para encontrarse con algún receptor en tierra. En el transcurso, tiene que atravesar diferentes capas de la atmósfera baja y alta (ver figura 12). Esto además de ser una desventaja para los sistemas de posicionamiento sirve para

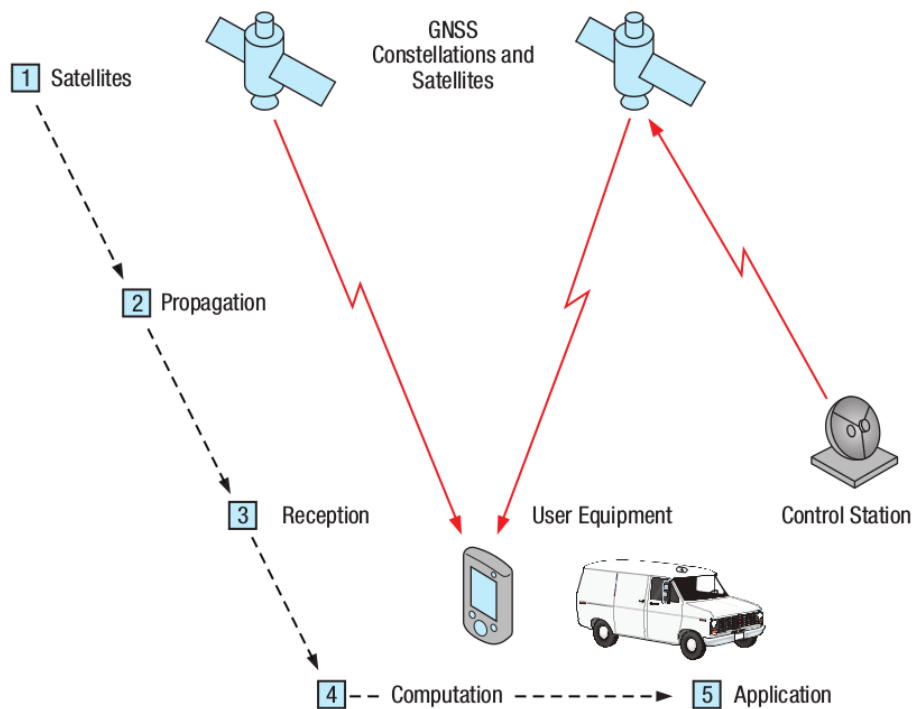


Fig. 11: Pasos para determinar posición y tiempo utilizando un sistema GNSS. Tomado de: Jeffrey, C. [2010].

el estudio de la densidad total de electrones sobre la ionosfera. Más adelante se introducirán los detalles para el cálculo de este parámetro.

Paso 3 - Recepción. El receptor reúne la información transmitida y determina el tiempo que tardó desde su emisión hasta su recepción. A este tiempo se le conoce como tiempo de propagación de la señal. El retraso de la señal debido a la ionosfera será un factor importante para calcular la densidad de electrones libres en esta región.

Paso 4 - Cálculo. El receptor mide su distancia hacia varios satélites (multiplicando el tiempo de propagación por la velocidad de la luz). Al procesar la distancia hacia tres satélites se puede obtener la posición en tres dimensiones, agregando un satélite más al cálculo, se pueden corregir los errores de sincronismo.

Esta distancia no es exactamente el tiempo de viaje de la señal (debido a la desincronización entre los relojes atómicos entre satélites y receptores, así como a los errores del retardo por propagación) sino que se le conoce como pseudorange o pseudodistancia.

Ahora que se conoce la estructura y los conceptos básicos del funcionamiento de los sistemas GNSS nos enfocaremos en la propagación de la señal sobre la atmósfera.

2.3 ARCHIVO OBSERVACIONAL RINEX

Para poder compartir todos los datos que recibe un receptor de una manera fácil y rápida se llegó a la convención de recurrir a un formato estandarizado que contuviera parámetros bien orientados tanto del satélite como fase, código, tiempo de observación y algunos otros del receptor mismo. Como consecuencia se desarrolló el formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna en 1989. Desde entonces, ha ido evolucionando de acuerdo a la necesidad de los usuarios. La versión más común hoy en día es la 2.10 que permite el almacenamiento de medidas de pseudorange, fase portadora y el efecto Doppler (Gurtner & Lou [2007]).

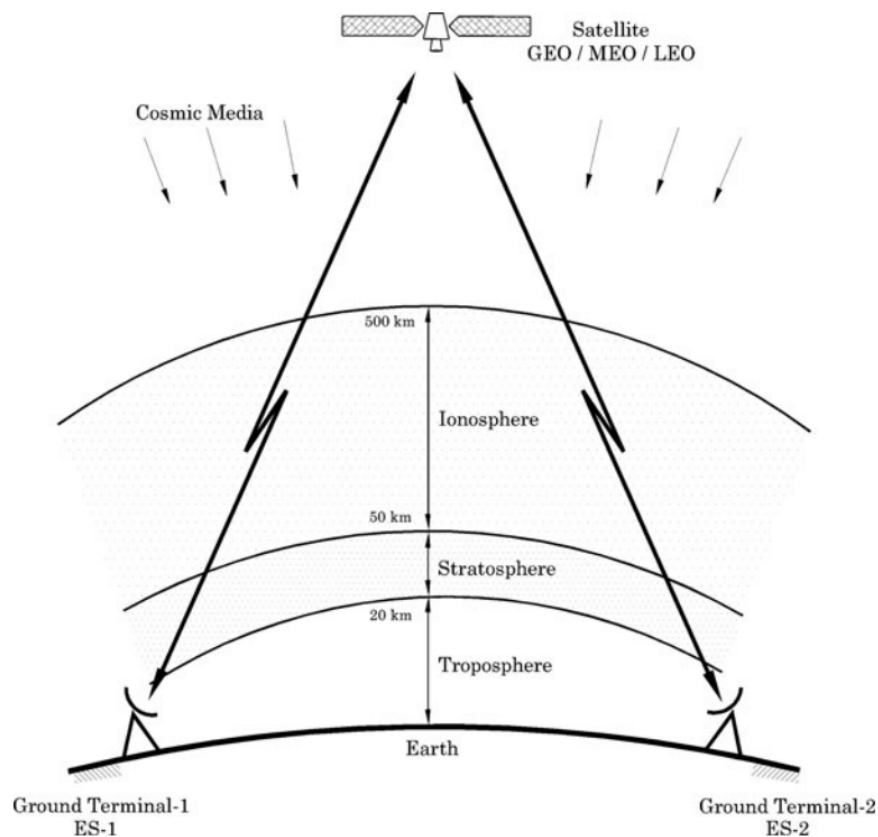


Fig. 12: Camino aparente de la señal entre el satélite y el receptor. Tomado de: [Ghasemi, A., Abedi, A., & Ghasemi, F. \[2013\]](#).

Actualmente la versión RINEX 3.03 consiste de tres tipos de archivos con extensión ASCII:

- Archivo de datos Observacionales.
- Archivo de datos Meteorológicos.
- Archivo de datos de Navegación.

La estructura de estos archivos puede verse en la figura 14 y consiste básicamente en dos secciones; la cabecera (*header*) y el cuerpo (*data*). La primera sección contiene la versión del archivo RINEX y resguarda la información básica de la antena como: nombre, coordenadas, altura, etc. Además, muestra el orden de las observaciones (#TYPES OF OBSERV), su intervalo de muestreo (#INTERVAL), el primer tiempo de observación (#TIME OF FIRST OBS) en el formato AAAA-MM-DD-HH-MM-SS, entre otros. Al final de la cabecera se encuentra la leyenda #END OF HEADER la cual denota el final de esta sección. A partir de esa leyenda, en el cuerpo, se encuentra la estampa de tiempo inicial a partir de la cual serán registrados los valores observados (en el formato AAAA-MM-DD-HH-MM-SS). Posteriormente, al costado derecho se observa el número de satélites observados por el receptor y cuales de ellos fueron (separadas con un espacio o con la letra G si pertenece a la constelación GPS, E si es de GALILEO, R de GLONASS, etc.) y las estampas de tiempos asociadas a cada una de las observacionales (L1, L2, C1, C2, etc) para cada satélite observado. Una vez registradas las observaciones, comienza una nueva estampa de tiempo inicial, dependiendo del intervalo de muestreo, y así sucesivamente hasta el final del día, es decir, un archivo observacional por día.

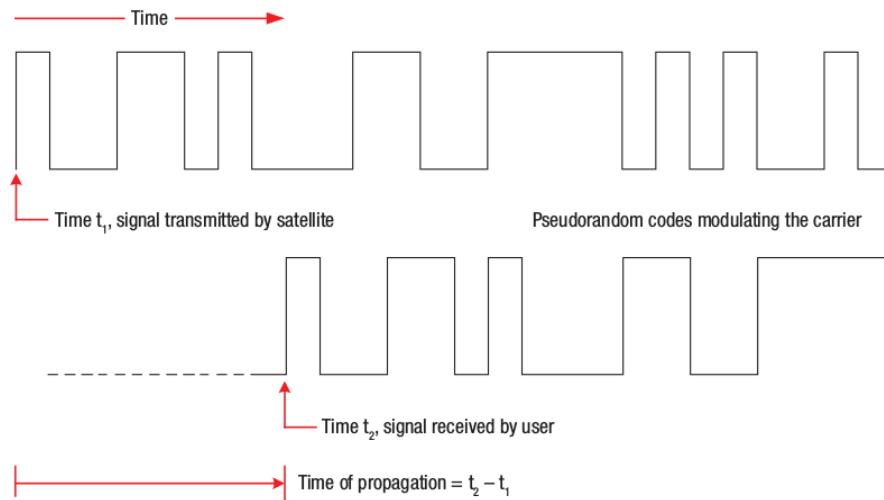


Fig. 13: Diferencia de tiempo entre el emisor y el receptor también conocida como tiempo de propagación de la señal. Tomado de: Jeffrey, C. [2010]

La página oficial del International GNSS Service ofrece una estructura general más detallada de los archivos RINEX: www.igs.org.

2.4 CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DE UN RECEPTOR

Para el cálculo de la distancia entre un satélite y el receptor tomemos como coordenadas (x^s, y^s, z^s) la posición del satélite y (x_u, y_u, z_u) las del receptor. En ese caso, la distancia real entre ambos sería:

$$r_u^s * (t) = \sqrt{(x_u - x^s)^2 + (y_u - y^s)^2 + (z_u - z^s)^2}$$

Por otro lado, los relojes del satélite y el receptor están dados por las ecuaciones $t^s(t) = t + \delta t^s(t)$ y $t_u(t) = t + \delta t_u(t)$ respectivamente. Donde δt representa el error en la medición del tiempo.

Finalmente, al hacer el cálculo del pseudorango (la distancia aproximada entre el satélite y el receptor) se obtiene:

$$\rho_u^s(t) = c(t_R - t_T) = r_u^s + c[\delta t_u - \delta t^s] + I + T + \varepsilon_\rho$$

Esta última ecuación incluye el retraso de la ionosfera I , la troposfera T y alguna otra consideración ε_ρ que pueda provocar error en la medición del pseudorango. El retraso de la ionosfera, particularmente, puede provocar errores en la posición de entre 3 – 30 m.

Similarmente, se puede calcular la fase observable φ , siendo de la forma:

$$\varphi_u^s(t) = r_u^s + N\lambda + c(\delta t_u + \delta t^s) + I + T + \varepsilon_\varphi$$

Donde λ es la fase portadora de la señal y los términos I, T y ε_φ son errores de medición (Davies Kenneth [1990]).

Cabecera o header

2.11 Observation data Mixed										RINEX VERSION / TYPE	
BNC 2.11.0 ustecdata 17-Apr-18 12:44										PGM / RUN BY / DATE	
RTCM_3 132.247.71.27/ZIHU										COMMENT	
ZIHU										MARKER NAME	
										OBSERVER / AGENCY	
										REC # / TYPE / VERS	
										ANT # / TYPE	
										APPROX POSITION XYZ	
										ANTENNA: DELTA H/E/N	
										WAVELENGTH FACT L1/2	
										# / TYPES OF OBSERV	
										TIME OF FIRST OBS	
										END OF HEADER	
18	04	17	12	45	0.0000000	0	12G 1G11G22G18G25G31G10G 3G26G14G16G32			0.000	
										Número e identificación de los	
										satélites observados por la estación	
22964613.108					0.000					0.000	
22964618.988	94036281.425								0.000		
23883309.642					0.000					0.000	
23883311.582	97798176.483								0.000		
23023449.248					0.000	120989036.771	43.500		0.000		
23023449.648	94277178.158								0.000		
21874693.776					0.000	114952287.256	48.000		0.000		
21874698.816	89573237.670								0.000		
24279512.780					0.000	127589701.975	37.250		0.000		

Cuerpo o data

Fig. 14: Ejemplo de la cabecera y cuerpo de un archivo observacional RINEX.

2.5 CÁLCULO DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES (TEC)

Aunque el retraso de la señal satelital, en parte provocado por la ionosfera, puede verse como una desventaja para el cálculo de la posición de un receptor, es también una oportunidad para estudiar la región alta de la atmósfera (o en su caso, la troposfera).

La combinación de las frecuencias duales en los satélites L1 y L2 ofrecen la posibilidad de conocer los efectos sobre la ionosfera con mayor precisión. Estos efectos de retraso son dispersivos y a su vez, el retraso γ es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia portadora. Utilizando estas dos frecuencias se puede remover casi perfectamente el error de retraso de la señal provocado por la ionosfera o bien, calcularlo.

Dados los valores de las frecuencias L1 y L2 para el sistema GPS de la tabla 3. El cociente γ está dado por:

$$\gamma = \frac{L1^2}{L2^2} \approx 1.65$$

Las estimaciones de retardos ionosféricos son también llamadas libres de geometría ya que son combinaciones lineales de pseudorangs que ya no dependen de la distancia entre el usuario y el satélite.

La definición de sTEC dada por la siguiente ecuación representa la suma de la densidad de electrones encerrada por el cilindro de sección transversal ds de 1 m^2 formado entre la línea de visión entre el receptor (R) y el satélite (S) cuyo resultado se atribuye a una cierta altura en la ionosfera ($\sim 350 \text{ km}$ generalmente).

$$s\text{TEC} = \int_R^S N_e ds$$

El parámetro sTEC se expresa en unidades TEC (TECu) donde 1 TECu es equivalente a 10^{16} electrones por metro cuadrado.

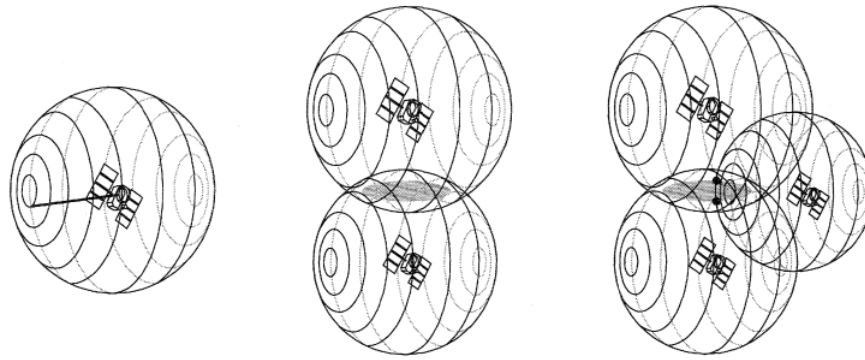


Fig. 15: **a)** Los puntos equidistantes a un satélite producen una esfera. **b)** Plano de intersección que equidista de dos satélites. **c)** Segmento de intersección que equidista de tres satélites. Tomada de: [Langley, R.B., \[1991\]](#)

2.6 APROXIMACIÓN A LA IONOSFERA UTILIZANDO GPS

En la figura 16 el TEC es atribuido al punto conocido como *Ionospheric Pierce Point* o IPP el cual se propone que la densidad máxima de la ionosfera se encuentra ubicada a 350 km de altura aproximadamente y como *Sub-Ionospheric Point* o SIP a la proyección vertical de este punto sobre la superficie terrestre.

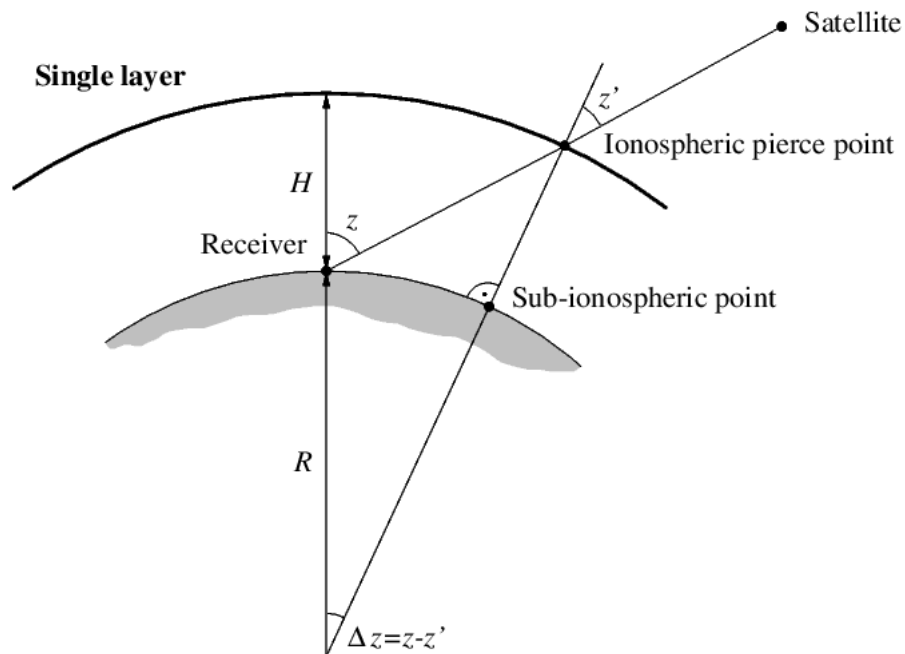


Fig. 16: Esquematación del modelo de capa delgada de la ionosfera. Donde R es el radio de la Tierra, H es la altura donde se encuentra la concentración máxima de electrones, z es el ángulo del receptor hacia el satélite, z' es el ángulo entre la línea del IPP (Ionospheric Pierce Point) y el SIP (Sub-Ionospheric Point). Tomado de: [Schaer, S. and Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique, \[1999\]](#).

Para obtener el valor del Contenido Total de Electrones sobre la vertical o VTEC se recurre a la relación geométrica:

$$\cos(z') = \frac{VTEC}{sTEC}$$

$$VTEC = sTEC * \cos(z')$$

Utilizando la ley de senos:

$$\frac{\text{sen}(z')}{R} = \frac{\text{sen}(180^\circ - z)}{R + H},$$

$$\text{sen}(z') = \frac{R}{R + H} \text{sen}(z),$$

De esta forma podemos ver la relación que existe entre el sTEC calculado y su proyección aproximada sobre la vertical vTEC. Este último valor es el que se utiliza sobre todo cuando se quiere conocer el comportamiento del plasma ionosférico local sobre una o varias estaciones.

2.7 MAPAS TEC

Combinando el filtro Kalman sobre las zonas que no existen estaciones, el modelo ionosférico IRI y el cálculo del valor vTEC sobre múltiples receptores y sus observaciones hacia las múltiples constelaciones satelitales es posible aproximar la densidad de electrones sobre una región determinada. Al complementar estos valores junto con la interpolación entre el modelo ionosférico el IRI95 es posible construir un mapa de densidad de electrones también conocido como mapa TEC.

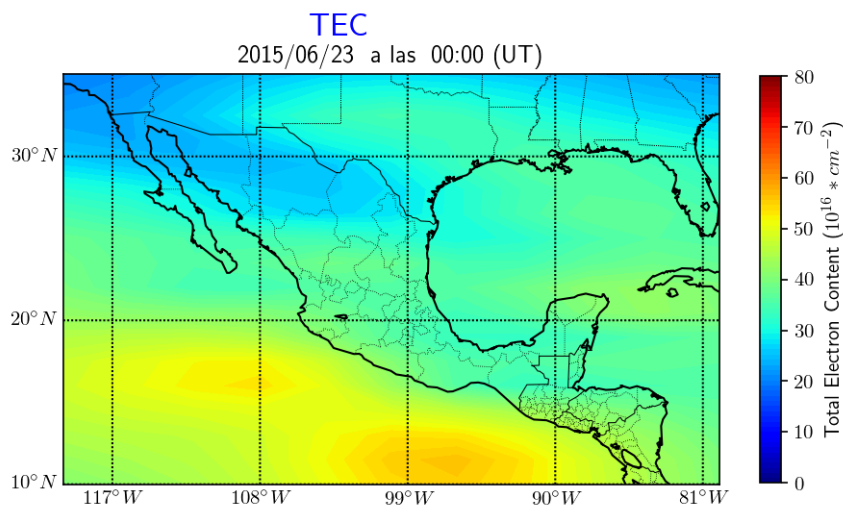


Fig. 17: Ejemplo de un mapa vTEC sobre territorio mexicano.

En el mapa de la figura 17, se muestra el contenido total de electrones en escala de colores *jet* donde el azul representa una baja densidad, mientras que colores cercanos al rojo una alta densidad. Esto para una fecha específica en formato (AAAA/MM/DD) y su respectivo tiempo universal. El producto final, mapas W (ver sección 3.4), será importante al momento de comparar el estado quieto de la ionosfera a un estado perturbado durante un evento de clima espacial.

Para calcular la densidad total de electrones se utilizó el código US-TEC, el cual es un producto desarrollado por el esfuerzo de varios organismos como el Centro de Predicción de Clima Espacial o SWPC (por sus siglas en inglés), Centros Nacionales de Información Ambiental o NCEI y los Sistemas de División Global o GSD. Actualmente colabora también el Servicio del Clima Espacial de México (SCiESMEX) con sede en el Instituto de Geofísica unidad Michoacán. En pocas palabras, este software (validado por trabajos como [Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Spencer, P.S.J. and Minter, C.F., \[2007\]](#) y [Fuller-Rowell, T., \[2005\]](#)) está diseñado para estimar el parámetro TEC sobre alguna región del mundo utilizando como entrada los datos de estaciones GPS y el filtro Kalman (descrito más adelante) como modelo de asimilación de datos.

Las secciones dentro de este cuarto capítulo están dedicadas a hablar sobre el funcionamiento de las rutinas GMAGIC y GPLOT, interfaces gráficas dentro del código US-TEC. Al mismo tiempo se describirán varios de los parámetros modificados dentro de estas rutinas, ya que las aplicaciones de este programa son muy complejas y variadas. Por último, cabe mencionar que los códigos están implementados en el lenguaje MatLab.

3.1 INTERFACES GRÁFICAS: GMAGIC Y GPLOT

La paquetería del software en el que se basa, MAGIC, fue desarrollado a partir de una investigación realizada por Paul Spencer y Mitchell en el año 2002. Esta herramienta fue diseñada para estudiar varios enfoques del problema de obtener una estimación de la estructura ionosférica con suficiente precisión principalmente para cuestiones de clima espacial y aplicaciones de posicionamiento geodésico.

A partir del 2014, Américo Gonzalez, encargado del Servicio de Clima Espacial Mexicano o SCiESMEX y del Laboratorio Nacional de Clima Espacial logró una colaboración con Dominic, de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) el cual facilitó el código US-TEC para estudios de ionosfera sobre territorio mexicano. Desde entonces, el laboratorio LACIGE utiliza MAGIC para obtener datos TEC durante fechas (en el pasado) donde ocurrieron tormentas geomagnéticas intensas, eclipses o ráfagas solares de clase X. Así mismo, en el LANCE, se está implementado el desarrollo de los mapas ν TEC en tiempo cercano al real utilizando datos de redes públicas y privadas, para uso exclusivo del monitoreo del clima espacial.

A continuación se describen algunos de los parámetros modificables más importantes dentro de la interfaz gmagic:

El primero de los parámetros modificados dentro de gmagic fue *GRID: 3D_US_HI* el cual realiza un mallado sobre la región de México en un rango de coordenadas que va desde $[10^\circ, 35^\circ]$ para la latitud y de $[-120^\circ, -80^\circ]$ en longitud, con Δ Latitud = 1.5° y Δ Longitud = 4° como lo muestra el mapa de la figura 18. En general, la resolución del mallado depende fuertemente de la distribución de las estaciones sobre la región. Computacionalmente, este mallado es una matriz conocida como matriz ASCII con los valores ν TEC (proyectados sobre la vertical) positivos en cada entrada. Es a través de esta cuadrícula que el usuario puede ir recolectando, para cada archivo, los valores en función del tiempo para algún punto geográfico específico y poder realizar un análisis local. Sin embargo, aquellos valores del mallado que se encuentran en zonas alejadas de las estaciones deben ser tomados con precaución, ya que el cálculo de la variable puede contener un error asociado mayor que en las zonas donde hay estaciones cercanas. Cada

nodo dentro de la malla fue calculado por el filtro Kalman y tiene como base el modelo ionosférico IRI95. Cabe mencionar que estos valores están multiplicados por diez para evitar las cifras decimales y reducir así el peso final del archivo.

Después de verificar que cada archivo observacional de la red SSN se encuentra dentro de las carpetas en la ruta */magicWorks/data/año/día/* el resto de los parámetros se modifica con base en la fecha a analizar. Algunos de los parámetros más importantes a modificar son:

1. **Processing Settings:**

2. *Start Date = La fecha inicial (en formato AAAA/MM/DD),*
3. *Days = días de la tormenta geomagnetica + días previos.*

4. **Input Data Settings:**

5. *Data Source >Select List = SSN (con extensión .sites y con coordenadas cartesianas XYZ)*
6. *Pre-process y Assimilate = Ambos seleccionados.*

7. **Filter Settings:**

8. *Interval = 15 mins (Frecuencia de datos desde 2 hasta 60 minutos)*
9. *Model = IRI95 (Versión del modelo ionosférico de fondo,)*
10. *Grid = 3D_US_HI (Malla personalizada de la figura 18),*

La sección *Input Data Settings* permite especificar las estaciones que se utilizarán para el procesamiento y asimilación de datos. El primero de estos dos procesos está relacionado a la organización y verificación de calidad de los datos mediante la herramienta gratuita *teqc*. Entre las funciones más destacadas que realiza *teqc* están la conversión de archivos observacionales y la extracción de las coordenadas X, Y, Z de la estación. El segundo, está basado en un método matemático conocido como filtro Kalman para calcular el valor vTEC iterativamente conjuntándolo con el modelo ionosférico IRI95 y asociando los valores a la matriz ASCII (más adelante se hablará con más detalle sobre el filtro Kalman).

Una vez elegidos estos parámetros, se corre el programa con el botón *Process* el cual trabaja secuencialmente desde MatLab los procesos seleccionados (Pre-process y Assimilate en este caso). Esta acción generará, después de un tiempo, una carpeta, la cual estará nombrada acorde a la previa decisión del usuario y será ahí donde se depositaron los archivos con extensión ".mat" correspondientes a los días deseados junto con archivos ".txt" por día, de las estaciones que se utilizaron durante el proceso. Adicionalmente y dentro de esta misma carpeta, se genera un archivo cabecera sin fecha que será utilizado por la segunda interfase llamada *GPLOT*.

Al acceder a *GPLOT* mediante la línea de comandos en MatLab, se abre una ventana que muestra la interfaz gráfica *gplot*. La rutina comienza al seleccionar la carpeta directorio (*LOAD*), donde se selecciona el archivo cabecera generado previamente por *gmagic*. Una vez seleccionado y cargado este archivo, el programa provee al usuario de un ventana adicional donde se visualiza la proyección sobre alguna región predeterminada. Después, dentro de la misma interfaz, se seleccionaron los siguientes parámetros y seleccionamos el botón *SAVE*.

1. *Output File = ASCII (Opción a VIDEO o IMÁGENES) ,*
2. *Plot = TEC (Mapa de valores TEC),*

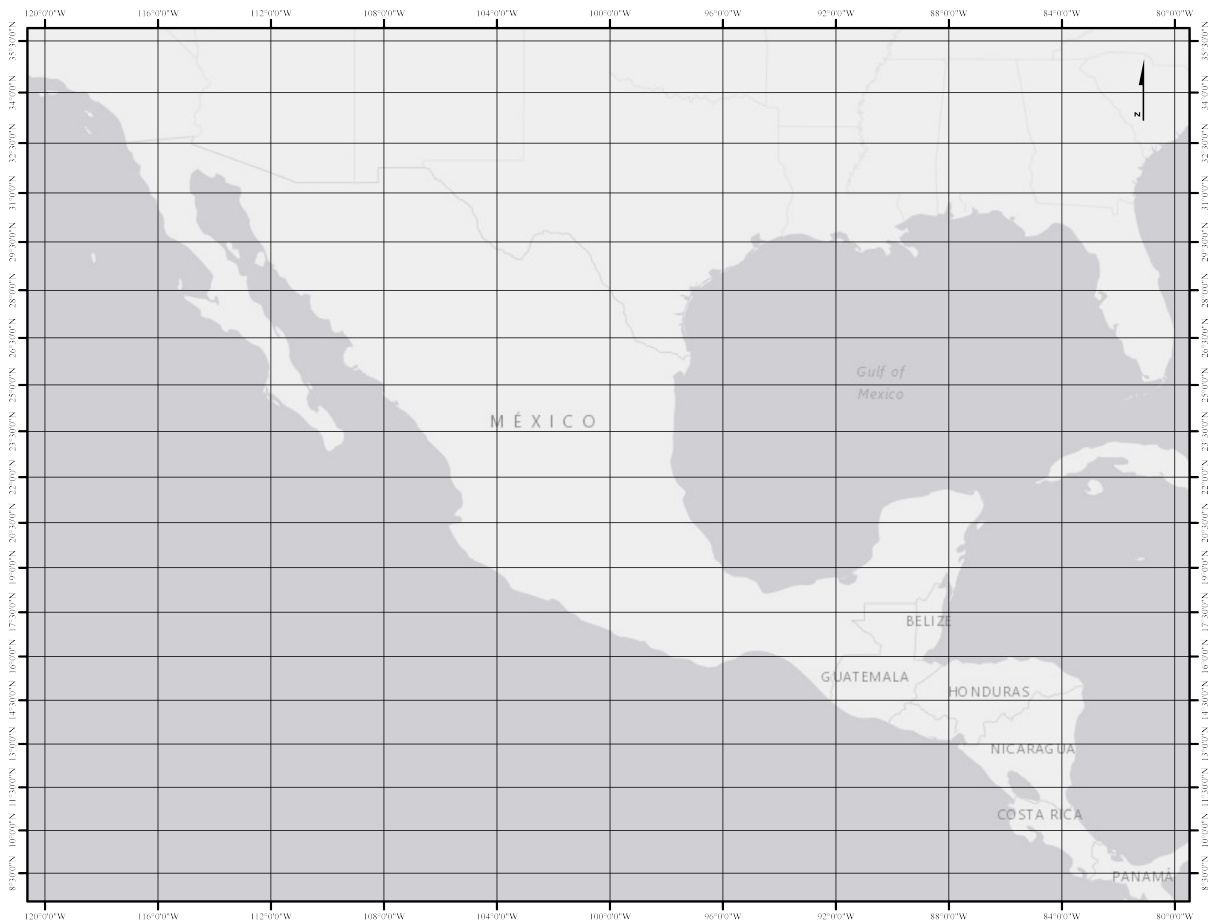


Fig. 18: Mallado definido por $\Delta\text{Latitud} = 1.5^\circ$ y $\Delta\text{Longitud} = 4^\circ$ dentro de US-TEC.

3. *Projection* = *US(M)* (Subconjunto de la matriz ASCII a proyectar),
4. *TEC* = *Inversion, Model, Model diff, Median diff y Error*,

Donde *Inversion* representa los valores TEC proyectados sobre la vertical o también conocido como *vTEC*, *Model* son los valores del modelo ionosferico IRI95, *Median diff* es la mediana a 27 días previos menos y *Inversion, Error* es la incertidumbre asociada al cálculo de TEC vertical.

Al terminar, se habrán creado el mismo número de archivos ASCII que los generados por *gmagic* pero ahora con extensión *.txt* correspondientes al tipo de valor seleccionado en el intervalo previamente introducido en *gmagic* en forma matricial bidimensional dados por latitud y longitud. Por ejemplo, para esta investigación se crearon las series de tiempo a partir de los valores *ITEC* y *mTEC* que corresponden a los valores TEC por inversión y su mediana, respectivamente. Sin embargo, para los mapas TEC solo se utilizaron los archivos *ITEC*. Como parte de las rutinas ejecutadas por el método US-TEC, se encuentra el filtro Kalman.

3.2 FILTRO DE KALMAN

Es un algoritmo matemático desarrollado por Rudolf Emil Kalman (Kalman, R. E. [1960]) cuya función es calcular parámetros que sólo pueden ser medidos indirectamente. Además de esto, puede ser usado para aproximar el estado de un sistema mediante la combinación de distintas mediciones. En pocas palabras agrega una medición a la estimación anterior para calcular una

nueva y más precisa. Esto sucesivamente hasta que la incertidumbre se minimice estadísticamente (Bothmer, V., & Daglis, I. A. [2007]).

En el caso del US-TEC, el filtro Kalman funciona como algoritmo de asimilación de datos para mapear la ionosfera terrestre en cuatro dimensiones utilizando la señal GPS. Para su funcionamiento también hace uso de software de terceros como el IRI95, el cual es un modelo ionosférico global que proporciona promedios mensuales de la densidad de electrones, temperatura de electrones, temperatura de iones y composición de iones en el intervalo de altitud ionosférica.

En esencia, este filtro actualiza de forma óptima, una solución a un problema de mínimos cuadrados lineales combinando observaciones temporales y una estimación previa a la solución dada por un modelo. En el caso del US-TEC, el campo de densidad de electrones en la ionosfera es la variable desconocida, que a su vez es el vector de estado x . Asociado a este vector está la matriz de covarianza, P , que representa la incertidumbre del estado y que cambia en cada iteración. La actualización de la matriz P lleva una secuencia definida a continuación:

La predicción de la variable de estado x , está dada por la variable de estado de la predecesora (signo negativo en la potencia).

$$x = Ax^- + B. \quad (1)$$

Las dos matrices A y B son generadas por las estimaciones de los modelos, M , de la siguiente forma:

$$A_{i,j} = (1 - \alpha)G_{i,j}M_i^-/M_j^+, \quad (2)$$

$$B_i = \alpha M_i^+, \quad (3)$$

en donde G es la matriz de correlación entre variables de estado espacialmente separadas y α es una constante.

La estimación de estado es x^+ y su error es $e_k = x^+ - x$. El error de covarianza P representa la incertidumbre en el estado expresada como

$$P = E[e_k e_k^T], \quad (4)$$

dado además un conjunto de observaciones integrales lineales, z , con covarianza R e integrales de trayectoria definidas por H , la ganancia de Kalman K está dada por:

$$K = \frac{PH^T}{HPH^T + R}, \quad (5)$$

por último, usando esta K , se actualizan el vector de estado y su covarianza reescritas de la forma:

$$x^+ = x + K(z - Hx), \quad (6)$$

$$P^+ = (I - KH)P. \quad (7)$$

En general, este filtro se vuelve muy útil cuando la variable de interés no puede medirse directamente pero si indirectamente. Además, combina la estimación de diferentes fuentes en la presencia de ruido y calcula la mejor aproximación entre ellas. Es por eso que sus aplicaciones son muy variadas, desde el procesamiento de señales, en sistemas de navegación hasta en el cálculo de la trayectoria del primer viaje tripulado hacia la Luna y de regreso (McGee, L.A. and Schmidt, S.F., [1985]).

Cabe mencionar que la asimilación de datos es solo uno de los tres procesos (y quizá el más importante) que realiza el método US-TEC dentro de la interfaz gmagic. Estos procesos fueron pieza clave para la elaboración de esta tesis con las cuales se procesaron los datos de las estaciones del SSN y se calculó el vTEC sobre la región mexicana. A continuación se describen las dos interfaces y los parámetros modificados en cada una de ellas.

3.3 RED DE ESTACIONES GPS

Los archivos de entrada para el funcionamiento tanto de gmagic como gplot son los archivos observacionales RINEX (ver página 23). Estos forman parte de una colaboración conjunta entre el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE). Cabe aclarar que la distribución y consulta de estos datos no es pública. Al utilizar los datos del SSN (coordenadas de las estaciones en la tabla 4) y el software *teqc* dentro de US-TEC, se garantizan los siguientes aspectos:

- Calidad y disponibilidad continua de los datos
- El número de estaciones disponibles a lo largo y ancho del país.
- Periodo de observación homogéneo de 15 minutos.
- Misma versión RINEX para todas las estaciones.
- Los datos no tienen brincos en los tiempos de observación, es decir, su observación es continua.
- El orden de sus observaciones es homogénea (L_1 , L_2 , P_1 , C_1 , etc)

El mapa 19 muestra la distribución de más de 50 estaciones (puntos en rojo) sobre el mallado del US-TEC para el territorio mexicano. Lo anterior jugará un papel fundamental a la hora de desarrollar y analizar el comportamiento de los mapas vTEC.

3.3.1 Estaciones en Coordenadas Geomagnéticas

En el caso de las series de tiempo, la relación entre el campo magnético de la Tierra y la respuesta de la ionosfera (ver capítulo 1, sección 2) hace necesario visualizar las estaciones de GPS en coordenadas geomagnéticas. La intensidad del campo puede ser especificada por medio de los elementos magnéticos H, D e I que hacen referencia a la magnitud de la componente horizontal, declinación e inclinación magnética, respectivamente. También se puede pensar a la declinación como la diferencia entre el norte magnético y el geográfico ($\sim 20^\circ$). La figura 20 muestra la relación entre las componentes magnéticas y geográficas. El elemento H es medido en gauss o nano teslas y D e I son medidas en grados y minutos de arco, respectivamente. La letra B representa la intensidad de campo magnético. En particular, se seleccionaron varias estaciones, alejadas entre sí, cuya componente horizontal H de campo fuera la misma, esto con la intención

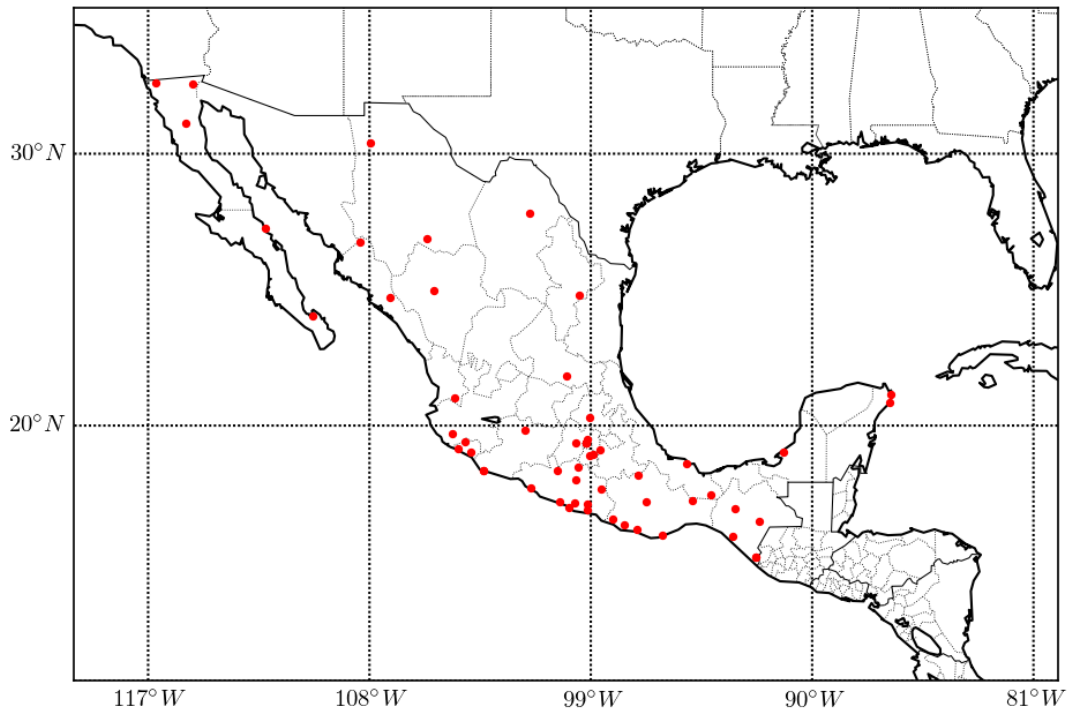


Fig. 19: Distribución de las estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional utilizadas para el procesamiento de datos de US-TEC.

de conocer si el comportamiento de la ionosfera sobre cada estación es el mismo o difieren y si es así, por cuánto. Lo mismo sucede para la declinación.

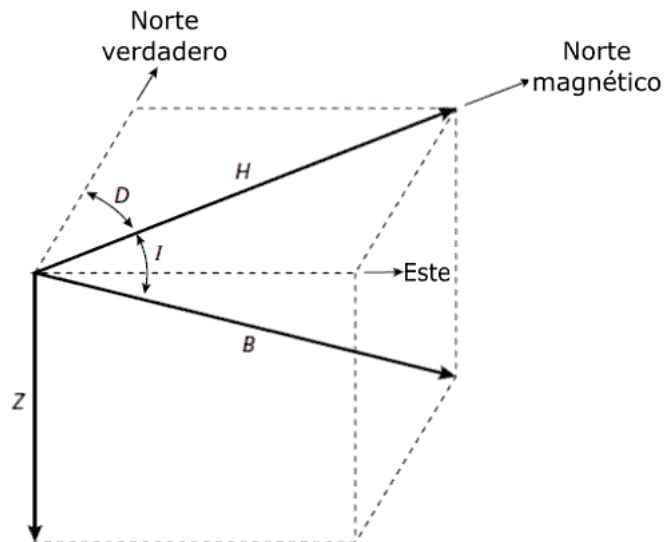


Fig. 20: Componentes del campo magnético terrestre.

Con base en sus coordenadas geomagnéticas, se seleccionaron un conjunto de cinco estaciones. Los mapas 21 y 22 muestran la posición de estas dos estaciones. De acuerdo con las líneas equipotenciales sobre la región, las estaciones MCIG y ZHIP comparten un mismo valor de declinación; mientras que las otras tres estaciones (RPIG, LPIG y SABY) comparten aproximadamente la misma componente horizontal de campo magnético.

Estación ID	Latitud	Longitud	Estación ID	Latitud	Longitud
acya	16.8428 °	-99.903 °	pmuv	18.5512 °	-95.1226 °
anig	21.063 °	-104.5207 °	pop1	19.0739 °	-98.6282 °
arig	18.2866 °	-100.3475 °	prue	19.3338 °	-99.1764 °
ayut	16.9927 °	-99.1453 °	puri	19.6727 °	-104.6371 °
caya	17.0535 °	-100.2673 °	rpig	21.8953 °	-99.9827 °
cgig	30.3918 °	-107.9773 °	saby	18.9738 °	-91.1865 °
cnco	21.1838 °	-86.8208 °	spig	31.0744 °	-115.466 °
comi	16.2862 °	-92.1369 °	srig	27.3394 °	-112.241 °
crig	16.7413 °	-99.1312 °	ssig	24.8313 °	-107.1449 °
csig	26.8548 °	-108.3711 °	ssnx	19.3343 °	-99.1768 °
daig	19.3345 °	99.177 °	stgo	19.3345 °	99.1769 °
dema	20.3086 °	-99.0354 °	tzig	14.8856 °	-92.2958 °
doar	17.0261 °	-99.6508 °	teco	18.9914 °	-103.861 °
hpig	26.9557 °	-105.664 °	tgig	16.7829 °	-93.1223 °
huat	15.7731 °	-96.1083 °	thig	14.8856 °	-92.2958 °
igcu	2.0098 °	-99.1764 °	tjig	32.4659 °	-116.6762 °
igua	18.3982 °	-99.5024 °	tlig	17.568 °	-98.5665 °
lnig	24.9132 °	-99.4656 °	tnat	40.1193 °	105.2062 °
lpig	24.1147 °	-110.3093 °	tnmr	18.2946 °	-103.3455 °
maro	17.096 °	-94.8838 °	tnpj	15.7085 °	-93.2189 °
mbig	32.4392 °	-115.1865 °	toig	18.1015 °	-97.0646 °
mcig	27.8979 °	-101.4837 °	ucoc	18.9163 °	-98.9321 °
mezc	17.9309 °	-99.6197 °	ucoe	19.8209 °	-101.6944 °
mmig	18.2946 °	-103.3455 °	uemo	19.6494 °	-101.2211 °
oaxa	17.0776 °	-96.733 °	unpm	20.8775 °	-86.8682 °
oxtu	16.1554 °	-97.6538 °	unto	19.3268 °	99.5976 °
pdig	25.0555 °	-105.396 °	unva	19.491 °	99.1471 °
pena	19.3977 °	-104.1014 °	uxuv	17.3232 °	94.1459 °
peig	16.0018 °	-97.1475 °	yaig	18.8691 °	-99.0669 °
pino	16.3972 °	-98.1273 °	zihu	17.6124 °	-101.465 °

Tabla 4: Identificador y coordenadas geográficas de las estaciones GPS del Servicio Sismológico Nacional utilizadas para el procesamiento de datos.

Cabe mencionar que los datos utilizados para los mapas de las componentes magnéticas sobre México fueron tomados del Modelo Magnético Global o WMM (en inglés) y los mapas junto con las estaciones fueron construidos usando el software ARCGIS <https://www.arcgis.com/index.html>).

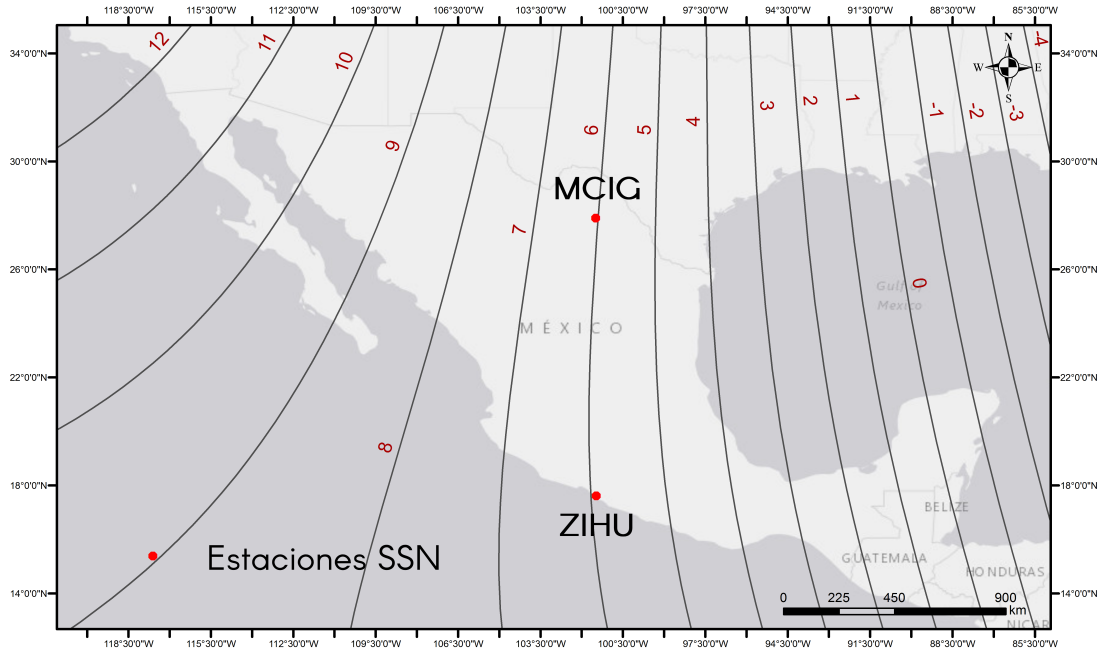


Fig. 21: Distribución de las estaciones MCIG y ZIHU sobre las líneas equipotenciales de declinación (D) del campo geomagnético (en grados).

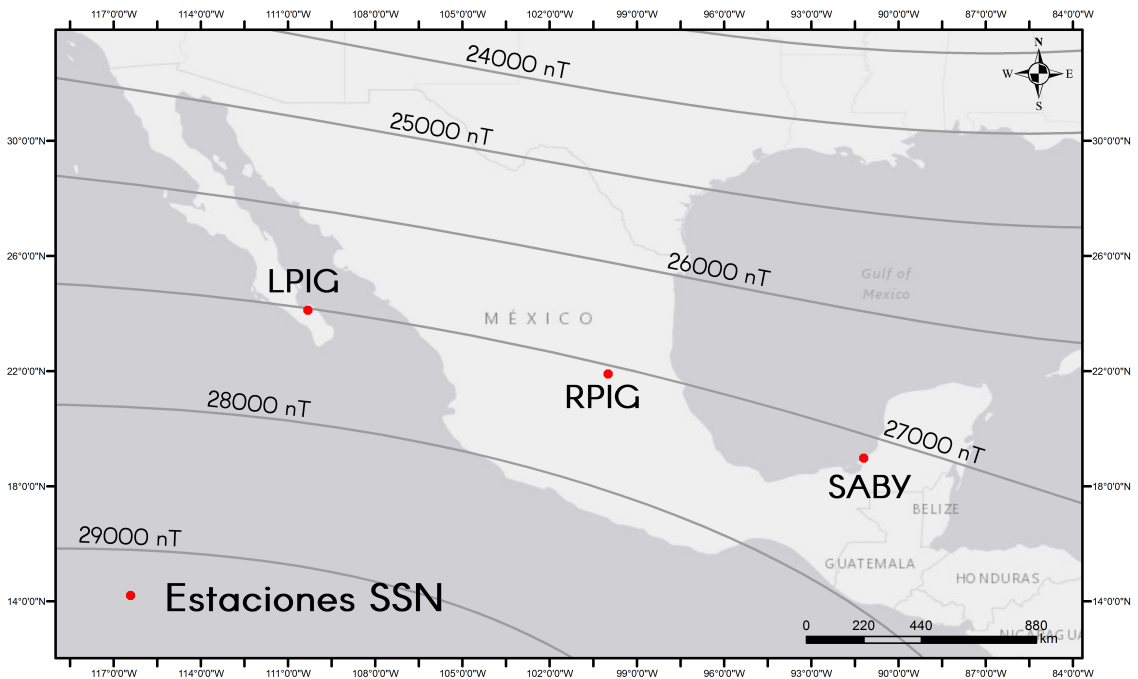


Fig. 22: Distribución de las estaciones LPIG, RPIG y SABY sobre las líneas equipotenciales de la componente horizontal H de campo geomagnético (en nano Teslas).

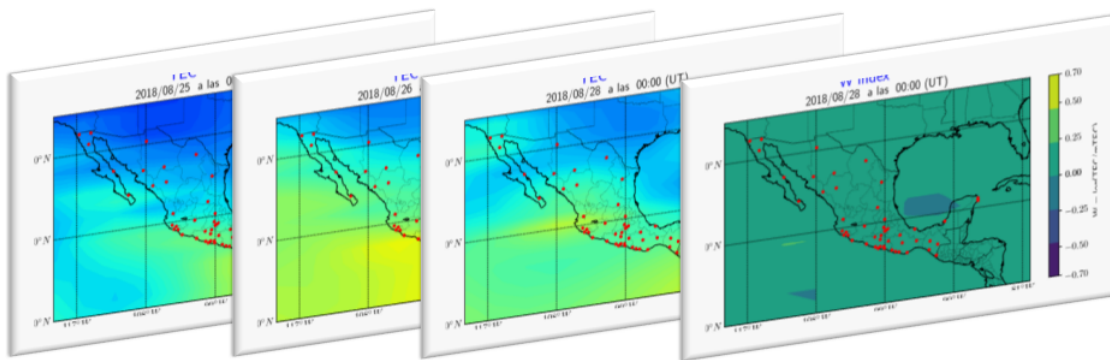
Al grupo de estaciones elegidas (MCIG-ZHIP y RPIG-LPIG-SABY) se les asocia una ubicación aproximada dentro del mallado propuesto en la sección anterior 3.1. Después de ubicar la intersección de las coordenadas geográficas de las estaciones seleccionadas o nodos con el mallado, se extraen los valores $vTEC$ para posteriormente hacer una comparación entre sus series de tiempo.

Una de las bondades del uso de US-TEC es la generación de mapas TEC incluso utilizando una sola estación GPS. Aunque, estos mapas por sí solos, ofrecen una perspectiva limitada del

comportamiento ionosférico regional. Una forma de estudiar las perturbaciones ionosféricas, es a través de la comparación de series de tiempo del vTEC durante periodos tranquilos con aquellos periodos perturbados. Es por eso que, para este trabajo, se implementaron los mapas W durante tormentas geomagnéticas intensas, los cuales permiten diferenciar el vTEC durante estos dos periodos, que resulta natural de la definición propia de este tipo de índice (a 27 días previos).

3.4 MAPAS DEL ÍNDICE IONOSFÉRICO W

Cuando se tienen los datos TEC de toda una rotación solar previa (~ 27 días) es posible calcular la mediana estadística la cual se denotará por mTEC a partir de la ecuación 1.8 y se encontrará de forma matricial y en series de tiempo. El diagrama de la figura 23 es un ejemplo de cómo se obtiene un mapa mTEC matricialmente y cómo se observa. El valor de la mediana TEC tiene el principal objetivo de resaltar el valor central de un orden jerárquico de valores vTEC. De esta forma depende solo del orden de los números y no de los distintos valores que tome este parámetro, es decir, de observaciones extremas.



$$\text{mediana}\{dia_1, dia_2, \dots, dia_{27}\} = \text{mTEC}$$

Fig. 23: Mapa de la mediana TEC a través de los mapas TEC de días previos.

Utilizando las matrices de las medianas TEC se vuelve posible calcular el índice W, definido previamente en el capítulo 1, aplicado a matrices, también llamadas en esta tesis como mapas W. Los mapas mTEC representarán la variación de referencia para un día tranquilo (notesé además que la escala de colores elegida para los mapas W fue *viridis*).

CASOS DE ESTUDIO (RESULTADOS)

En este capítulo se muestran los casos de estudio a aquellos eventos dentro del ciclo solar 24 en que ocurrieron tormentas geomagnéticas intensas basándonos en el índice geomagnético ecuatorial Dst. Dicha selección comenzó al observar los valores del índice geomagnético Dst finales a lo largo de los 365 días de cada año, desde el correspondiente comienzo (enero del 2008) hasta el final del ciclo (aún en curso en enero del 2019). Los valores finales del índice Dst se obtienen a través de la página: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>. Siguiendo la clasificación de una tormenta geomagnética intensa (ver página 8) fue posible identificar la fecha y hora en que los valores son menores a -150 nT.

La tabla 5 enlista, en orden de ocurrencia, aquellas tormentas clasificadas como intensas (Sugiura, M., and S. Chapman [1960]), así como el valor y hora en que el índice Dst alcanzó su valor mínimo. Es importante recalcar que el tiempo de las tablas, mapas y series que se presentan en este trabajo están dados en Tiempo Universal (UT en inglés). Adicionalmente, los tiempos de arribo para las tablas de las eyecciones de masa coronal están dados en tiempo de observación por los coronógrafos.

Evento	Fecha [dd/mm/aa]	Tipo de TG	Dst min [nT]	Hora [UT]	Duración (días)
# 1	17/03/15	Intensa	-222	23:00	~ 9
# 2	23/06/15	Intensa	-204	05:00	~ 10
# 3	20/12/15	Intensa	-155	23:00	~ 6
# 4	26/08/18	Intensa	-174*	07:00	~ 7

Tabla 5: Tormentas geomagnéticas intensas ocurridas durante el ciclo solar 24 y su correspondiente valor mínimo en el índice Dst. *Datos crudos sin verificación (ver www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp).

A la par, se muestran las eyecciones de masa coronal relacionadas a la tormenta geomagnética. Los datos recopilados para estas tablas son obtenidos del catálogo de SOHO (Solar & Heliosphere Observatory) a través de la página: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/. Adicionalmente, la base de datos utilizada para las tablas de las ráfagas solares fue tomada de la misión japonesa Hinode (Watanake, et al., [2012]).

Estas fechas marcan el punto de partida para el análisis de la respuesta ionosférica al paso de la tormenta geomagnética. Para tales efectos, se utilizaron series de tiempo $vTEC$ o en términos simples TEC, $mTEC$ (mediana TEC calculada a 27 días previos) y mapas TEC. En ambos casos se calculó el índice ionosférico W , además de los dobles picos diurnos (DDM) cuando los hubo. Ambos productos fueron construidos a partir de las salidas que da el método USTEC, descrito en el capítulo 3 y utilizando los datos de las estaciones del Servicio Sismológico Nacional.

4.1 EVENTO DEL 17 DE MARZO DE 2015

La tormenta más intensa, según el índice Dst para el ciclo solar 24, fue la de marzo de 2015 (ver tabla 5). Su duración, contando desde la fase del SSC, fue de 9 días aproximadamente. Abarcó desde el 16 al 25 de marzo. Esta tormenta geomagnética tiene su origen en dos fenómenos distintos: primero, la inmersión de la Tierra dentro de una región de interacción corrotante a partir del día

13 del mes. Después, el arribo de una eyección (ver tabla 6) el día 17 de marzo originada días antes en el disco solar.

Fecha	Hora (UT)	Velocidad Lineal	Aceleración	E_k
dd/mm/aa	hh:mm:ss	[km/s]	[m/s ²]	[erg]
15/03/15	01:48:05	719	-9.0	7.7e+31

Tabla 6: Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015.

Así mismo, observando el flujo de rayos X durante el periodo considerado de la tormenta se registraron varias ráfagas solares, entre ellas una de clasificación M1.0 (ver tabla 7) y del lado día respecto a México.

Fecha	Hora (UT)	Clase	Sun
dd/mm/aa	HH:MM		Location
17/03/15	23:34	M 1.0	S21 W56

Tabla 7: Lista de ráfagas solares que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015.

Al reconstruir los mapas W sobre territorio mexicano (ver gráfica 24) se encontró una región con perturbación de +4 y dos más negativas con -4 sobre distintas regiones. La primera, ocurrió una hora después de la primera caída del Dst (~ 19:00 horas), mientras que las dos negativas ocurren durante la fase principal del índice Dst. Cabe mencionar que las tres perturbaciones presentaron una duración de 1 hora aproximadamente. Además, fueron localizadas sobre la parte oeste y noroeste del territorio mexicano.

Observando las series de tiempo vTEC sobre las estaciones MCIG y ZIHU se obtuvieron las gráficas presentadas en las figuras 25 y 27. Estas series presentan un comportamiento diferente entre sí debido a la inclinación del eje de rotación terrestre. Se observan también picos dobles sobre la variación diurna TEC. Este tipo de comportamiento es característico sobre todo durante el periodo de la tormenta geomagnética y es consistente con trabajos como Pi, X., et. al., [1993]. Lo anterior puede ser observado más notablemente durante la fase de recuperación el día 19 de marzo sobre la estación ZIHU donde el DDM es de 15%.

En el caso de MCIG (gráfica 25), el primer día (17 de marzo) se registra un valor observado vTEC por debajo de la mediana TEC con diferencia máxima de -21.7 TECu a las 21:00 horas, mientras que los últimos días de la tormenta se registran valores bajos de vTEC por arriba de la mediana. La máxima diferencia fue de 8 TECu el día 18 a las 19:00 horas. Por otro lado, la serie de tiempo del índice W presenta, en su mayoría, valores por debajo del valor cero para los primeros días y positivos a finales del periodo. Además, presenta una frecuencia diurna visible durante todo el periodo y que rebasa los umbrales de W +4 y W -4 en varias ocasiones (el 17, 23, 24 y 25 de marzo) entre las 12 y 13 horas (ver gráfica 28). Aunado a esto, existe otra perturbación con W -4 el día 17 a las 21:00 horas con valor mínimo de -0.36 con duración de una hora, es decir, tres horas después de la primer caída del índice Dst.

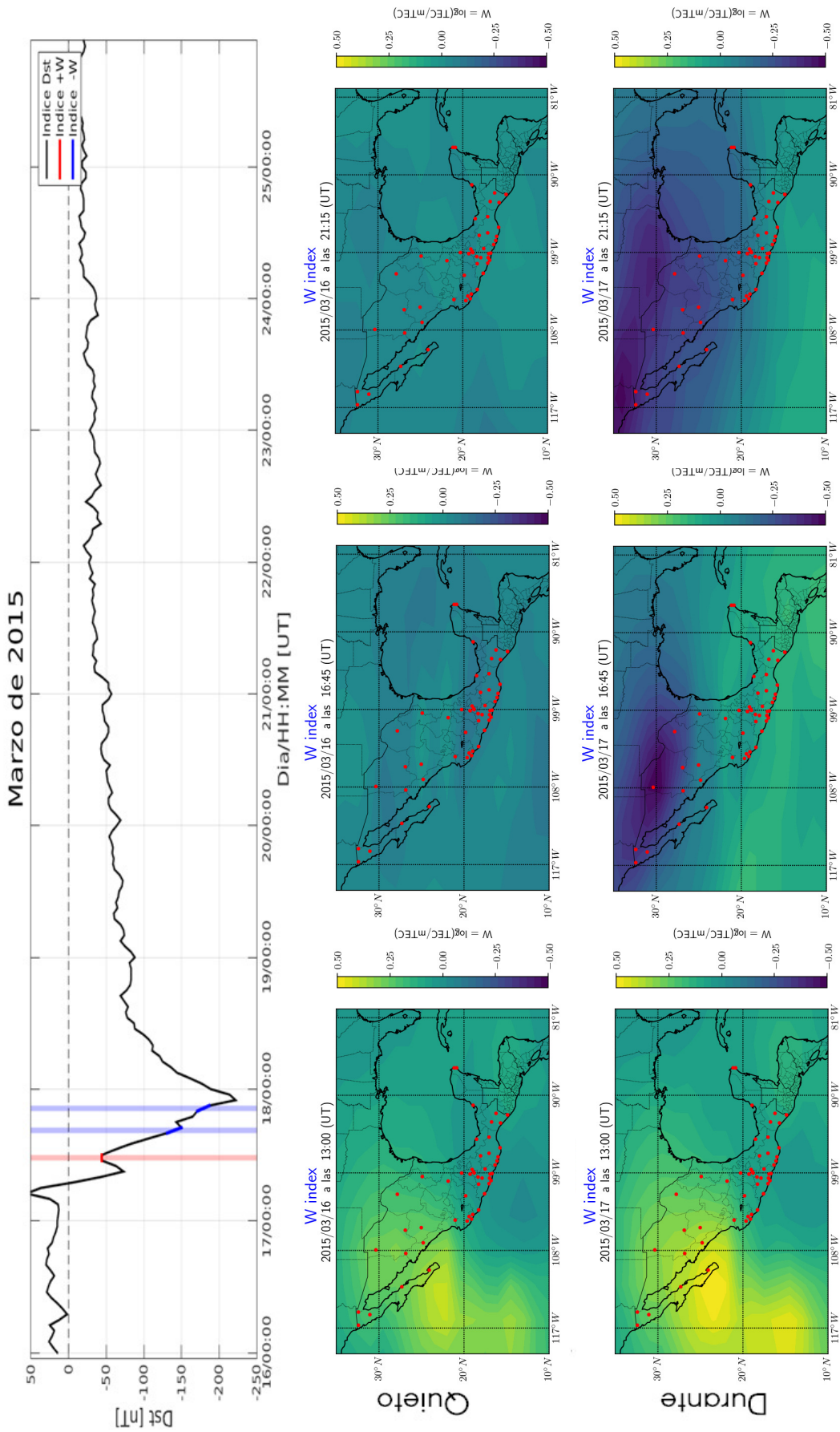


Fig. 24: **Panel superior:** Índice Dst durante la tormenta geomagnética de marzo de 2015. Las líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. **Paneles inferiores:** Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano.

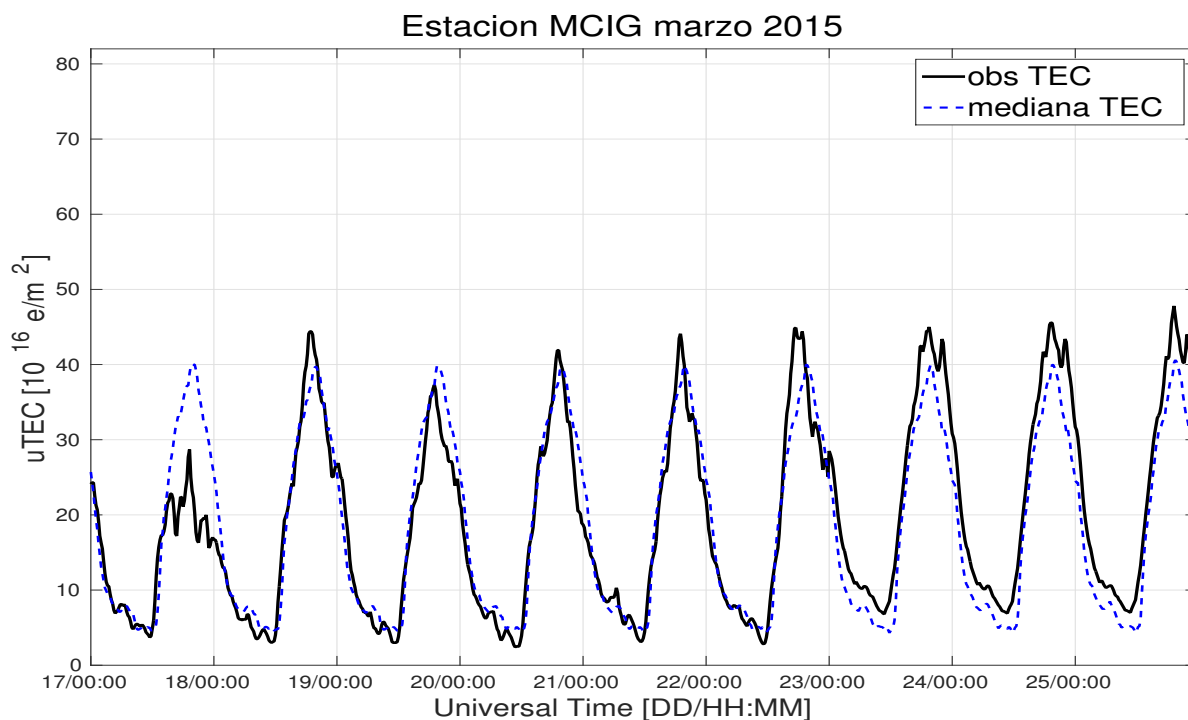


Fig. 25: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

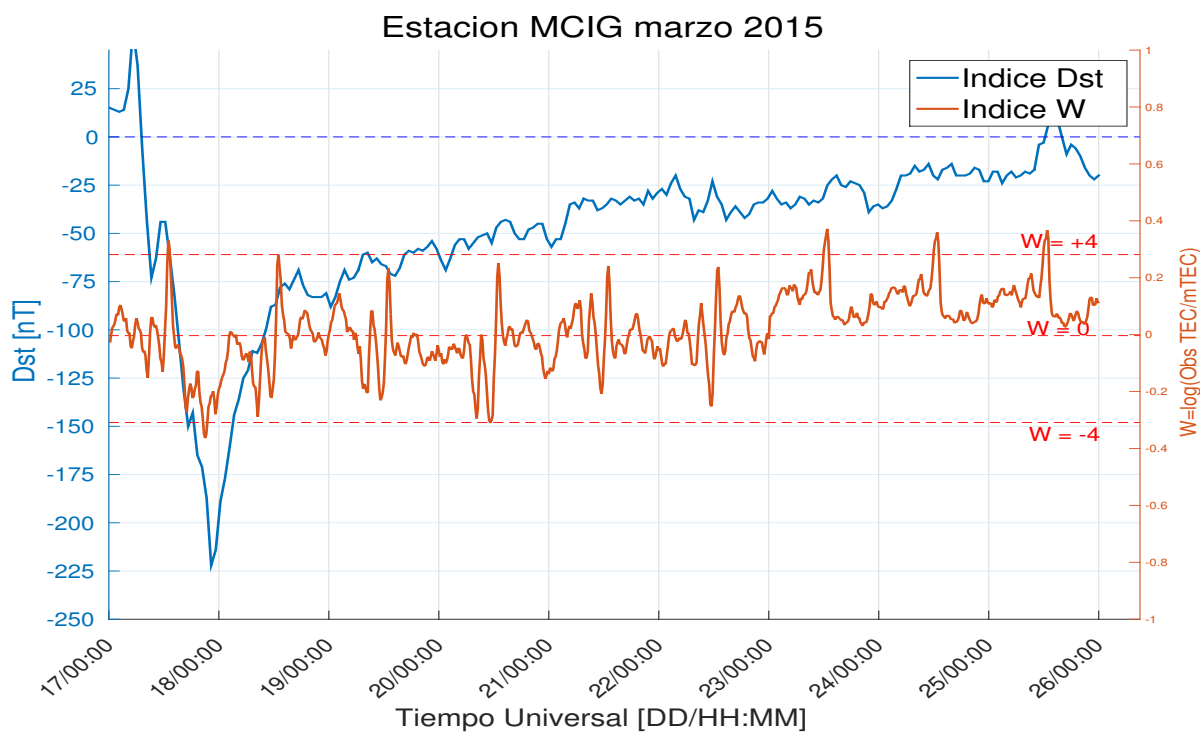


Fig. 26: Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

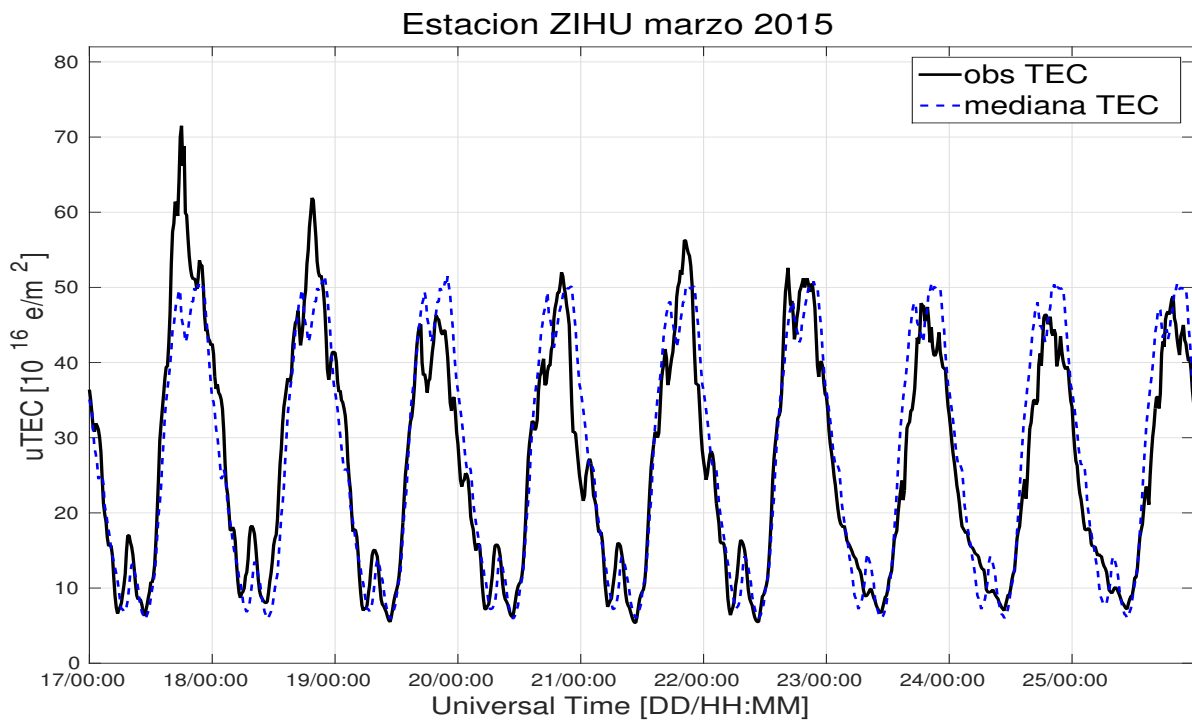


Fig. 27: Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

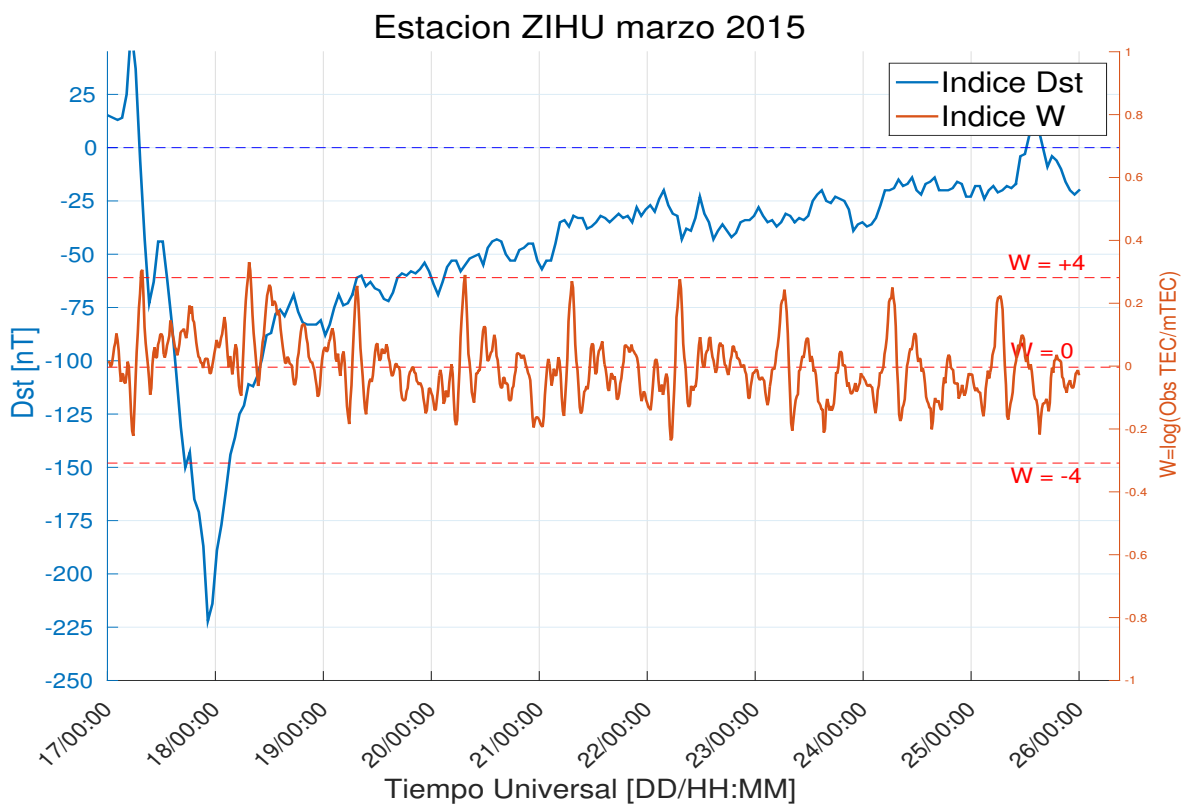


Fig. 28: Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

A una menor latitud, la serie de tiempo vTEC sobre la estación ZIHU (ver gráfica 27) muestra valores por arriba de la mediana para los primeros días de la tormenta. Posteriormente, los valores vTEC están, en su mayoría, por debajo de la mediana. La diferencia máxima es de 25.6 TECu el día 17 a las 18:00 horas y su diferencia mínima es de -17.4 el día 20 a las 23:00 horas. Su serie de tiempo en el índice W, tiene un valor máximo de 0.33 el día 18 a las 07:30 horas. Así mismo el umbral W +4 fue rebasado en tres ocasiones (los días 17, 18 y 20 de marzo). El valor mínimo de W fue de -0.23 el día 22 de marzo.

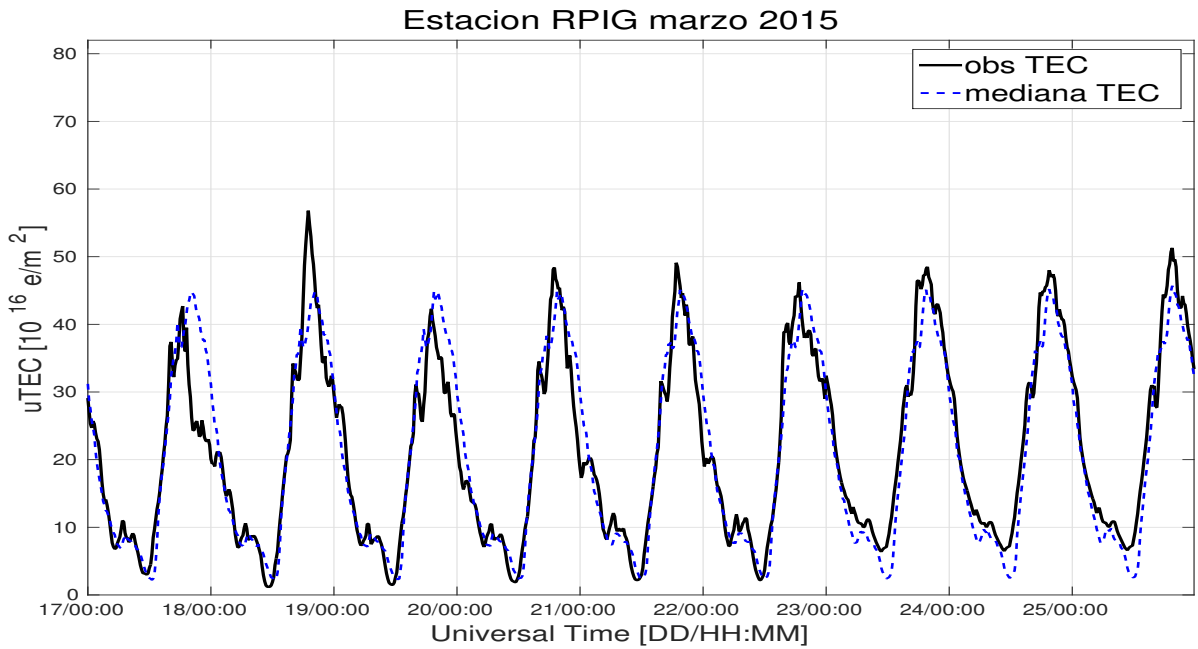


Fig. 29: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

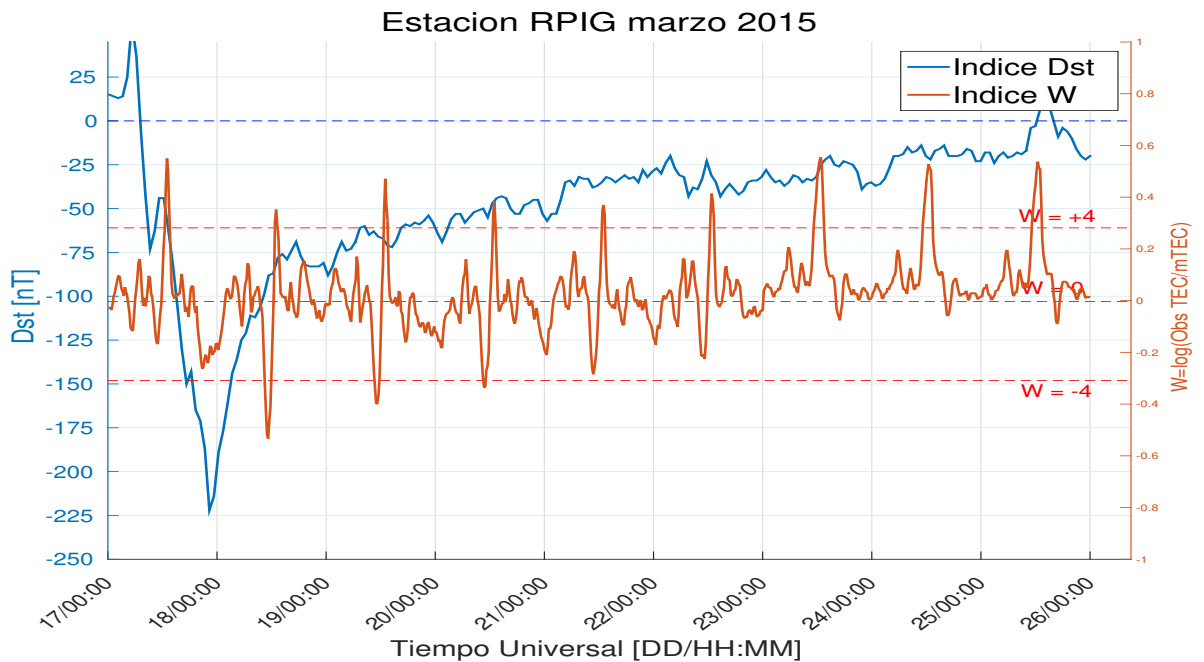


Fig. 30: Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

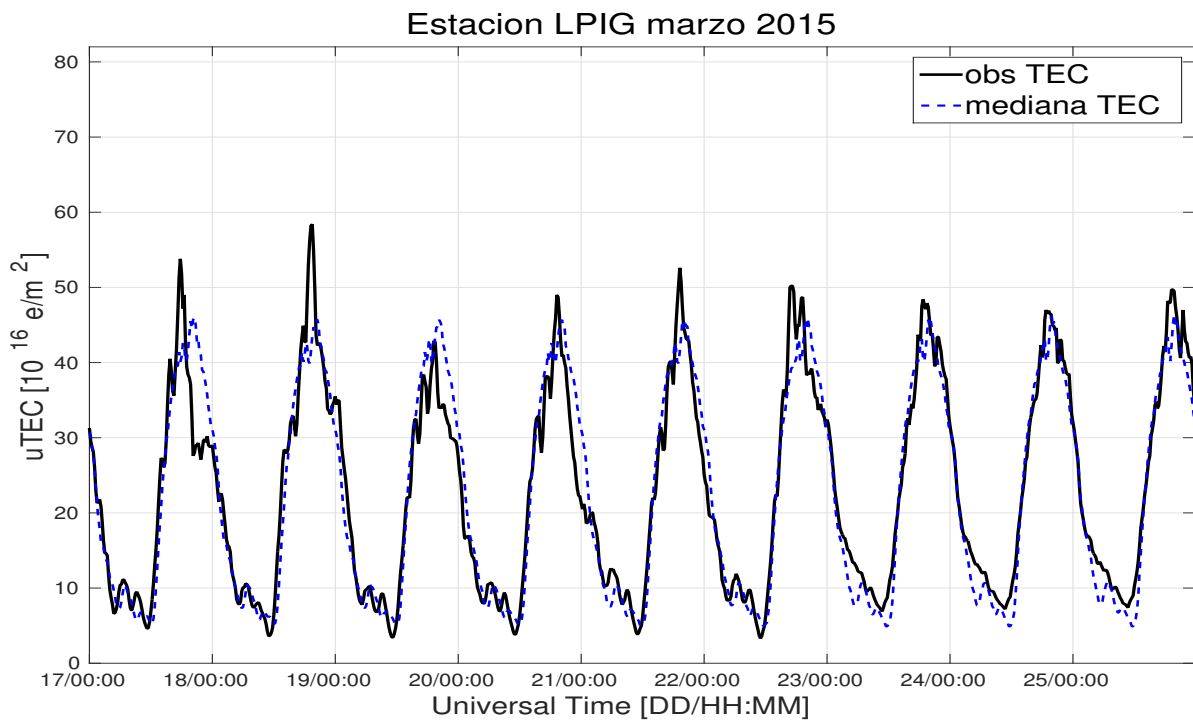


Fig. 31: Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

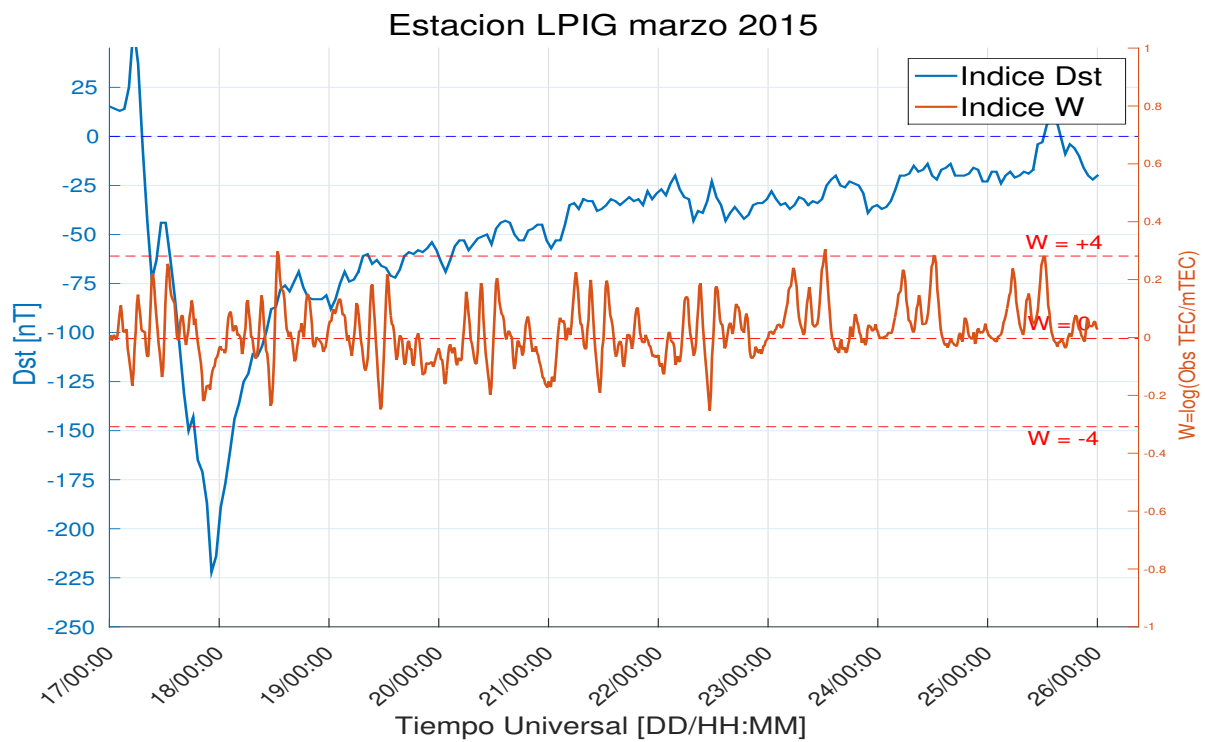


Fig. 32: Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

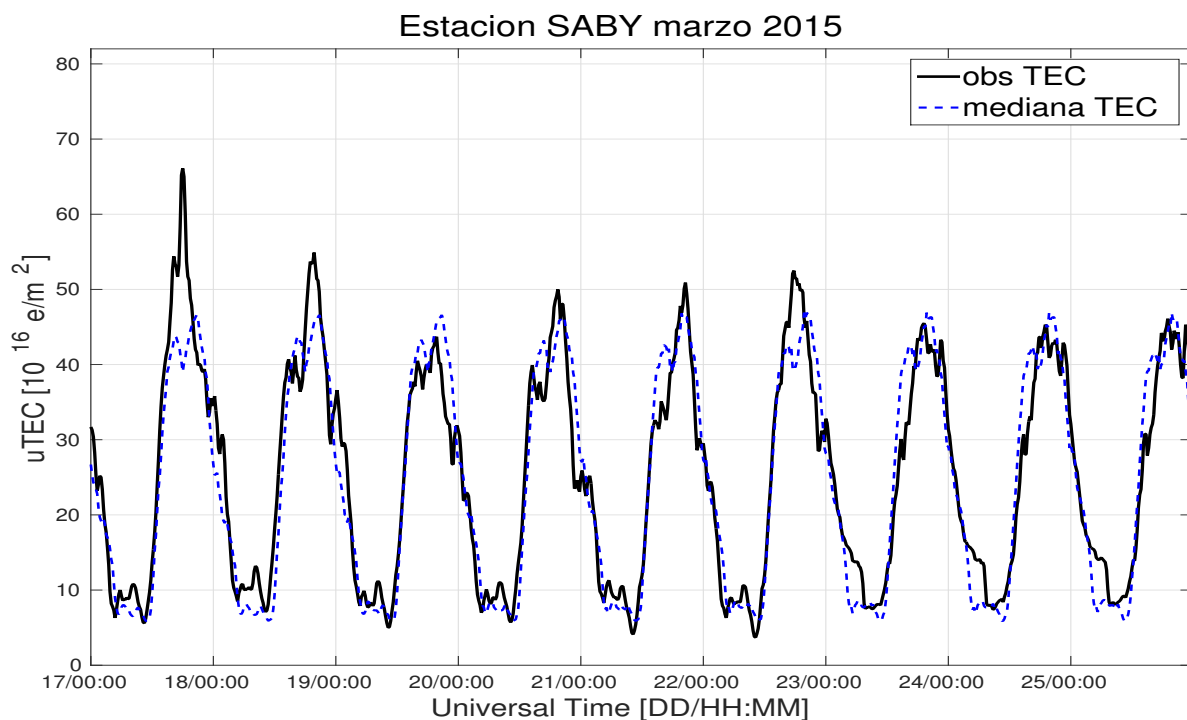


Fig. 33: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

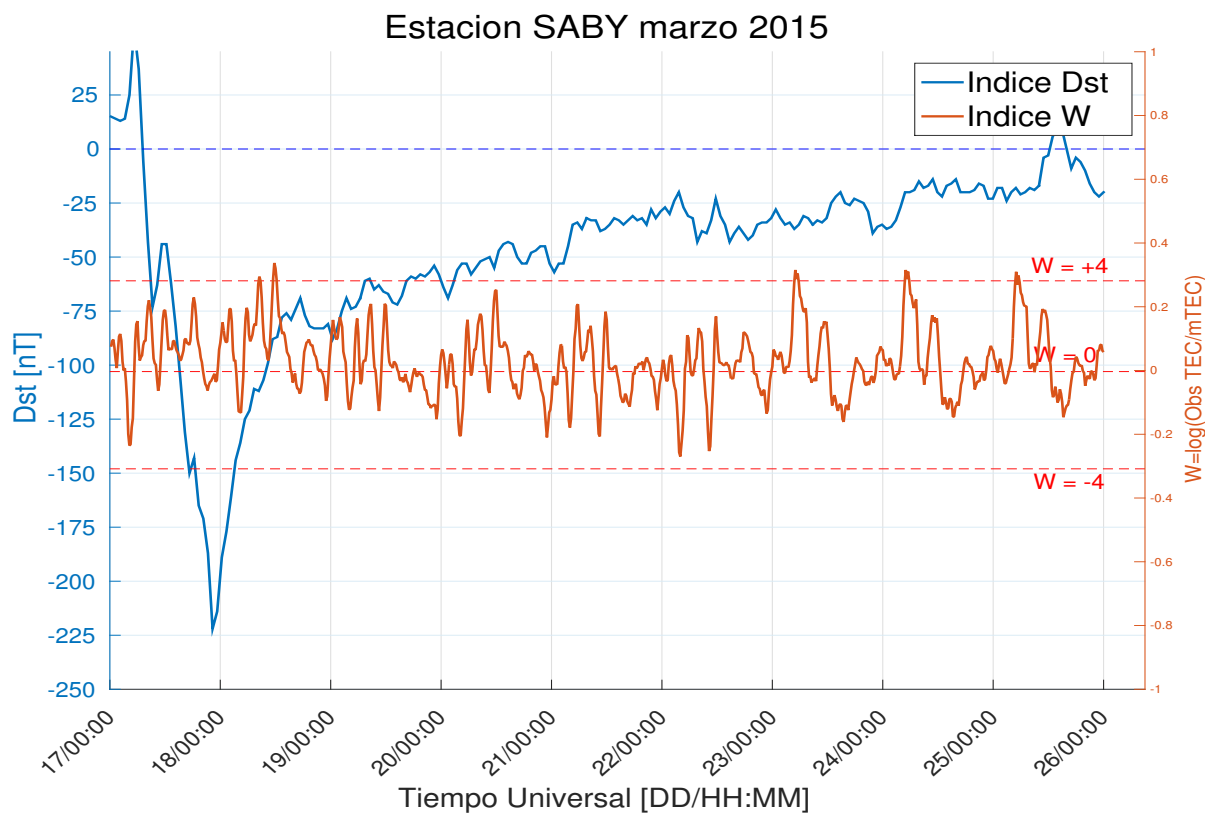


Fig. 34: Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

Las gráficas 29, 31 y 33 muestran el comportamiento diurno del $vTEC$ sobre las estaciones RPIG, LPIG y SABY. En todas ellas se observa que el $vTEC$ calculado está por arriba de la mediana durante el día 18 de marzo, pero además durante el día 17 se observa que el $vTEC$ observado cambia de estar por debajo de la mediana $vTEC$ a estar por arriba de ella (de oeste a este). Los valores máximos positivos encontrados fueron de 16.8, 16.7 y 27.1 TECu, mientras que las diferencias mínimas fueron de -20.2 , -18.1 y -14.6 TECu, respectivamente. Similar a la estación ZIHU, se observan ligeramente dobles picos diurnos sobre las estaciones RPIG, LPIG y SABY. Al analizar el índice W de estas tres estaciones (gráficas 30, 32 y 34), se encontraron varias perturbaciones intensas positivas y negativas. Todas las estaciones revelan una perturbación intensa positiva el día 18 a las $\sim 07:00$ horas y al final del periodo varias perturbaciones positivas de $W \sim 0.3$. La estación RPIG inclusive, detectó perturbaciones negativas intensas y, una hora después, tormenta positiva intensa. Al final de la fase de recuperación del índice Dst , esta estación alcanzó valores de hasta 0.55 en el índice W .

En resumen, las diferencias máximas y mínimas encontradas no siempre corresponden al máximo de perturbación en el índice W aún dentro del periodo correspondiente a las tormentas geomagnéticas. Adicionalmente, se encontraron varias perturbaciones con $W +4$ y -4 que afectaron varios puntos sobre territorio mexicano. Además, existe una perturbación negativa sobre MCIG durante la fase de inicio, a diferencia de ZIHU que es perturbación positiva. De la misma forma, la estación al este como RPIG sufrió una perturbación negativa a diferencia de la estación al oeste como SABY donde la perturbación es positiva. Finalmente, la estación más perturbada de las cinco analizadas, fue RPIG, ubicada en la parte oeste del país.

4.2 EVENTO DEL 23 DE JUNIO DE 2015

La segunda tormenta intensa del ciclo solar 24 fue la de junio de 2015. A ella se le atribuyen varias eyecciones de masa coronal (ver tabla 8). La primera de ellas, es la del día 19 de junio que por su velocidad lenta, fue alcanzada por la segunda del 21 de junio. La fuerte componente B_z de ambas provocó el valor mínimo del día 23 en el índice Dst . Antes de que la magnetosfera pudiera recuperarse completamente, nuevamente otra eyección del día 22 arribó y provocó de nueva cuenta que los valores del índice Dst descendieran el día 25 hasta -86 nT. Lo anterior nos lleva a considerar el periodo de análisis del 21 de junio, que es cuando ocurre el SSC hasta el 30 del mismo mes, fecha en que finaliza la fase de recuperación. Cabe mencionar que esta tormenta fue la de mayor duración de todas.

Fecha	Hora (UT)	Velocidad Lineal	Aceleración	E_k
dd/mm/aa	hh:mm:ss	[km/s]	[m/s ²]	[erg]
19/06/15	06:42:50	584	19.5	2.0e+31
21/06/15	02:36:05	1366	21.2	9.0e+31
22/06/15	18:36:05	1209	-25.1	3.2e+31

Tabla 8: Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 23 de junio de 2015.

Las ráfagas solares de la tabla 9 describen la actividad en flujo de rayos X durante los días de la tormenta. Además, se pueden apreciar solo las ráfagas que ocurrieron justo cuando el territorio mexicano está de frente al Sol. Mismas que serán consideradas al momento de analizar el comportamiento de la ionosfera.

Dentro de dicho periodo, el comportamiento de la ionosfera sobre territorio mexicano durante las ráfagas solares comparado con la mediana $vTEC$ y el índice Dst se ilustra en la figura 35. La figura muestra tres momentos de los valores máximos del índice W. Una perturbación positiva y tres negativas, con una duración de una hora aproximadamente y todas ellas después del mínimo Dst. Además, su localización se concentra al noroeste y sur del país.

Localmente, el $vTEC$ observado sobre las estaciones MCIG y ZIHU se muestra en las gráficas 36 y 38, respectivamente. Los niveles del parámetro $vTEC$ son mayores de nuevo a causa del gradiente latitudinal. Sobre ambas estaciones se observa la perturbación negativa durante la fase de inicio y recuperación de la tormenta. Las diferencias máximas entre el $vTEC$ observado y la mediana fueron 11.5 TECu el 23 a las 07:00 en MCIG y 10 TECu el 22 a las 01:00 para ZIHU. Las diferencias mínimas fueron -13.2 TECu el 23 a las 17:00 para MCIG y -23.9 TECu el 23 a las 22:00 para ZIHU. Se observa además, que ambas estaciones registran dobles máximos diurnos en varias ocasiones (DDM entre 20% y 40%). Estas anomalías ocurren durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética. Lo anterior, es congruente con el trabajo de Pi, X., et. al., [1993].

Fecha	Hora (UT)	Clase	Sun
dd/mm/aa	HH:MM		Location
21/06/15	18:19	M 1.1	S18 W64
22/06/15	18:10	M 6.5	N12 W08

Tabla 9: Lista de ráfagas solares que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 23 de junio de 2015.

Las gráficas 37 y 39 muestran los valores del índice W local sobre MCIG y ZIHU respectivamente. Para la estación MCIG, el índice rebasó el umbral +4 en cuatro ocasiones y el umbral -4 solo en dos. La perturbación máxima fue el 23 a las 05:30 horas con un índice W igual a 0.53 a las 07:00 horas, con una duración de una hora y media y después de dos horas del mínimo Dst. Cuatro horas más tarde ocurrió otra perturbación intensa, pero ahora negativa, la cual alcanzó valores de -0.44 a las 11:00 horas. En el caso de ZIHU, el mínimo valor negativo en el índice W fue de el día 23 a las horas, es decir, horas después del mínimo Dst. Posteriormente, se encuentran otras tres perturbaciones intensas el día 26, 27 y 28 de junio. Todas ellas a la misma hora (a las 12:00 horas).

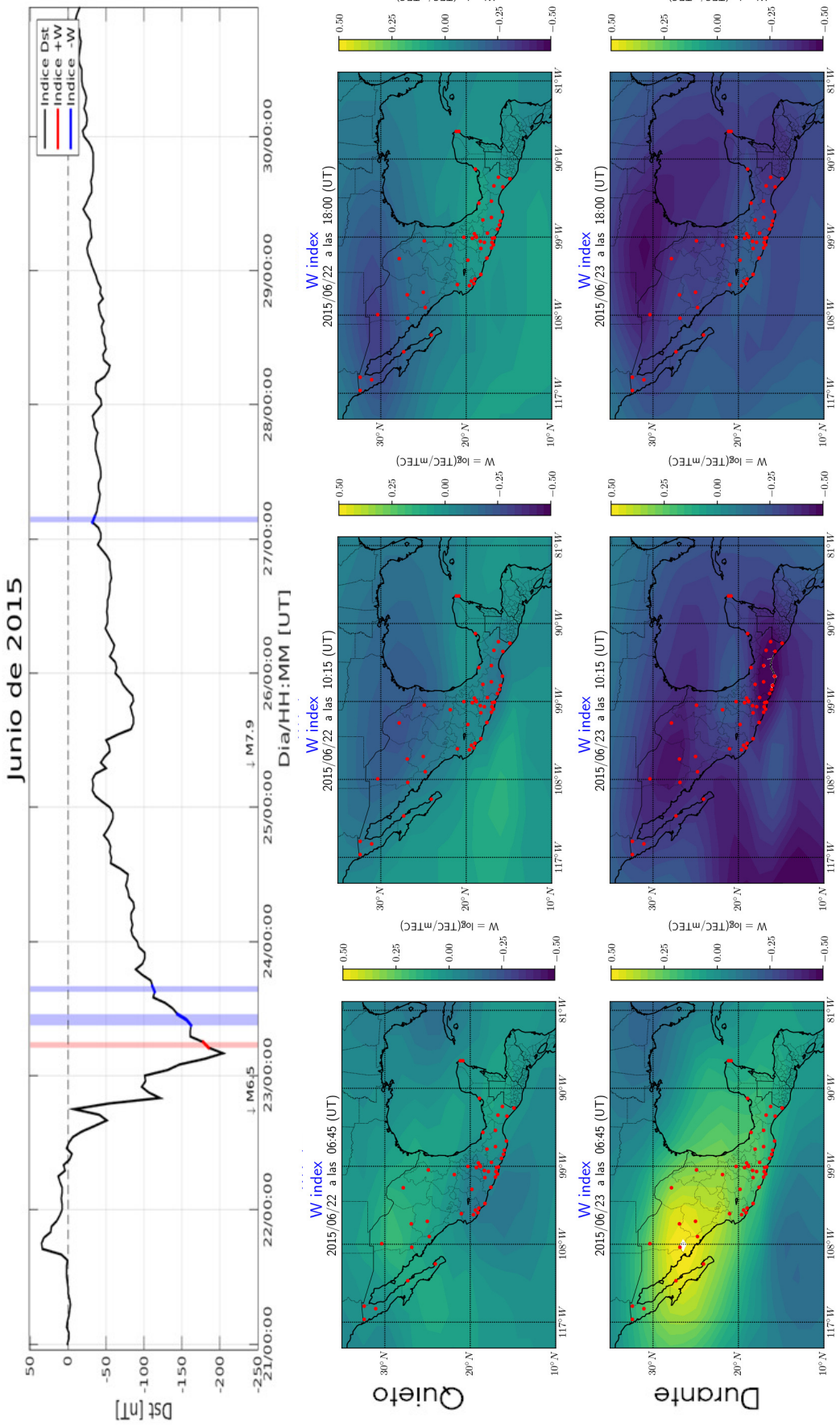


Fig. 35: **Panel superior:** Índice Dst durante la tormenta geomagnética de junio de 2015. La líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. **Panels inferiores:** Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano.

En cuanto a las estaciones RPIG, LPIG y SABY (gráficas 40, 42 y 44) se observa un patrón similar durante los primeros cuatro días de la fase de recuperación del índice Dst. Durante este periodo, los niveles vTEC observados son, para las tres estaciones, menores que la mediana vTEC principalmente, durante el primer día (24 de junio). Además de esto, se observan picos múltiples durante el día, más pronunciados a latitudes bajas y al este del país como lo registró la estación SABY. Los porcentajes que equivalen a estos picos oscilan entre 25% y 38%. Sus diferencias máximas del vTEC observado y la mediana fueron de 15.4 TECu para RPIG el día 23 a las 06:00 horas, de 18.2 TECu para LPIG el día 23 a las 06:00 horas y de 16.8 TECu para SABY el día 22 a las 23:00 horas. Mientras que la diferencia mínima fue de -19.1 TECu sobre RPIG el día 25 a las 20:00 horas, de -19.8 TECu para LPIG el día 26 a las 22:00 horas y de -24.8 TECu para SABY el día 23 a las 21:30 horas. Al graficar el índice W sobre cada estación se obtuvieron las gráficas 41, 43 y 45. La estación RPIG registró el mayor valor W de 0.47 el día 23 a las 06:30 horas y SABY el menor valor W de -0.50 el día 23 a las 10:30 horas.

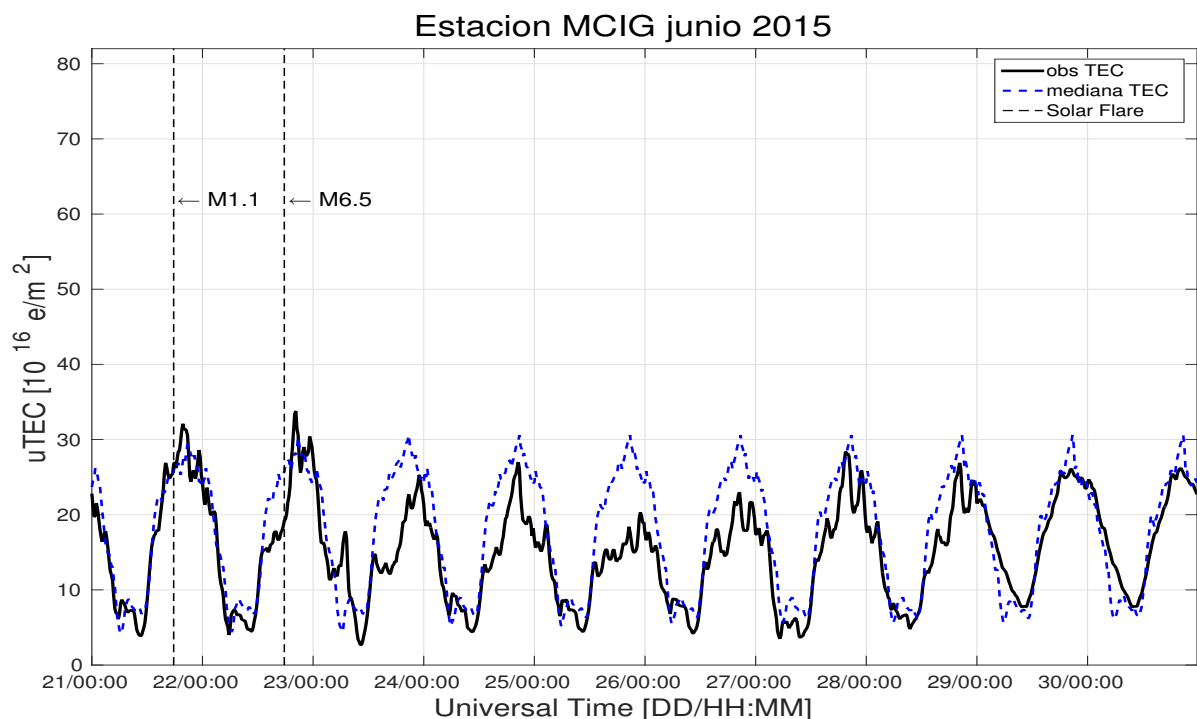


Fig. 36: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

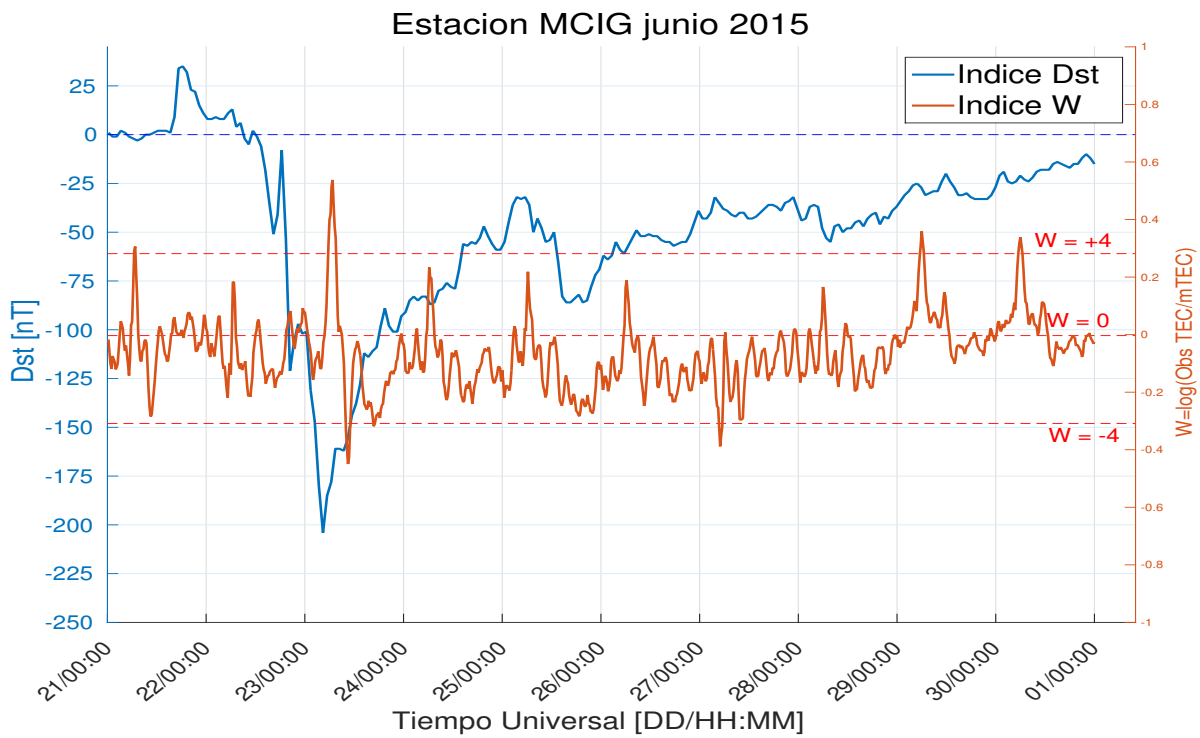


Fig. 37: Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

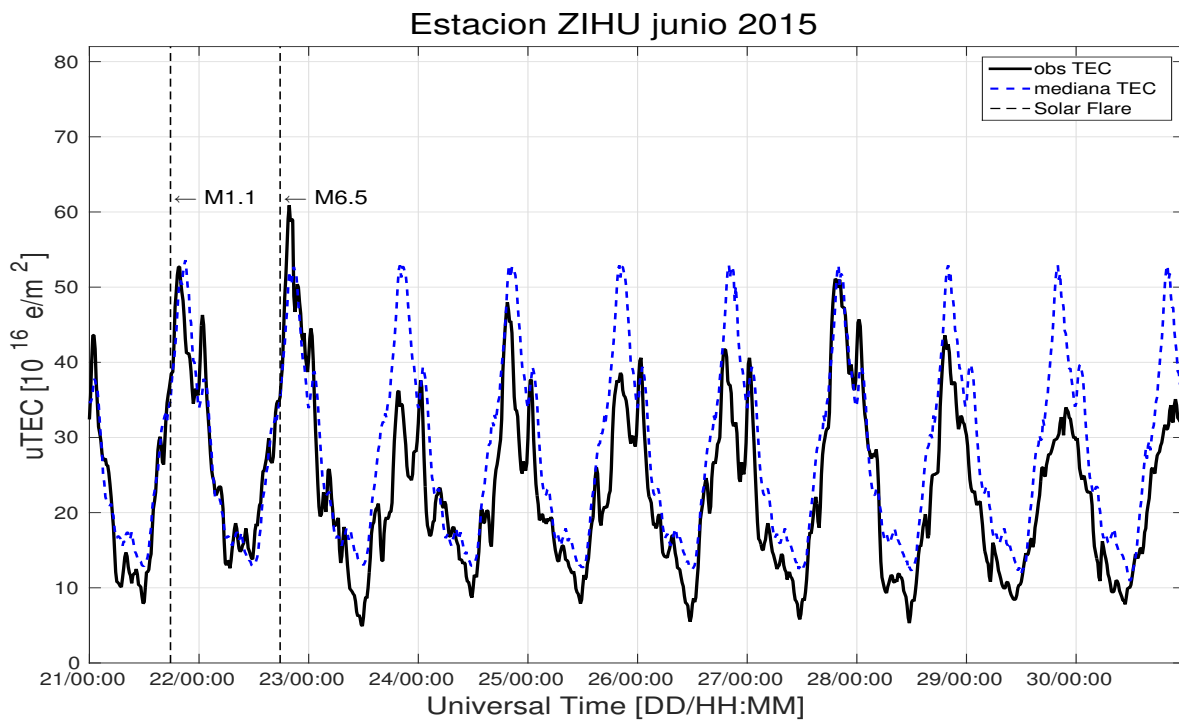


Fig. 38: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

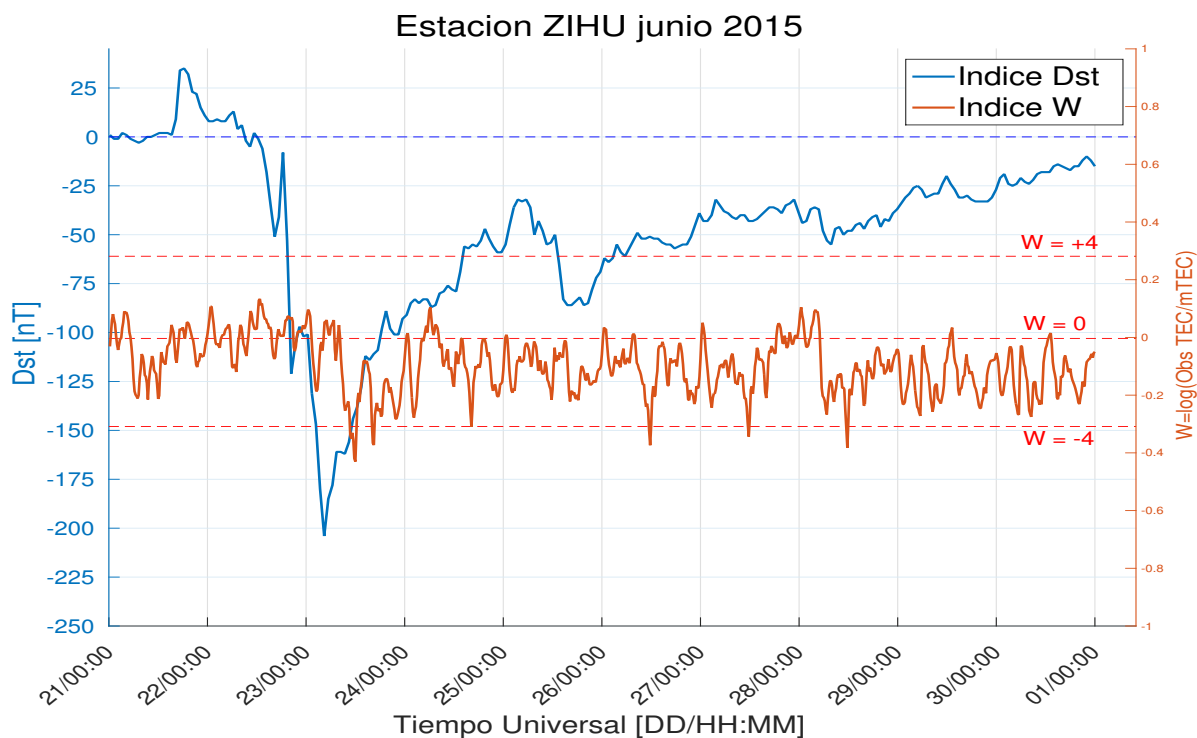


Fig. 39: Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

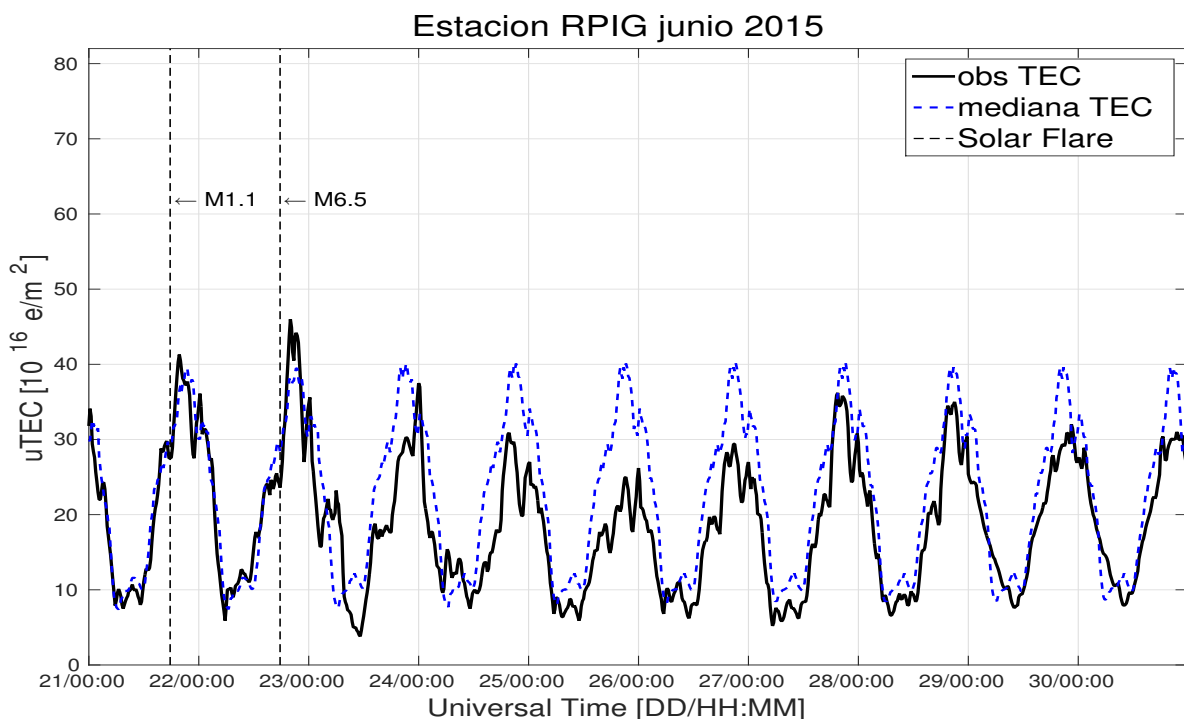


Fig. 40: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

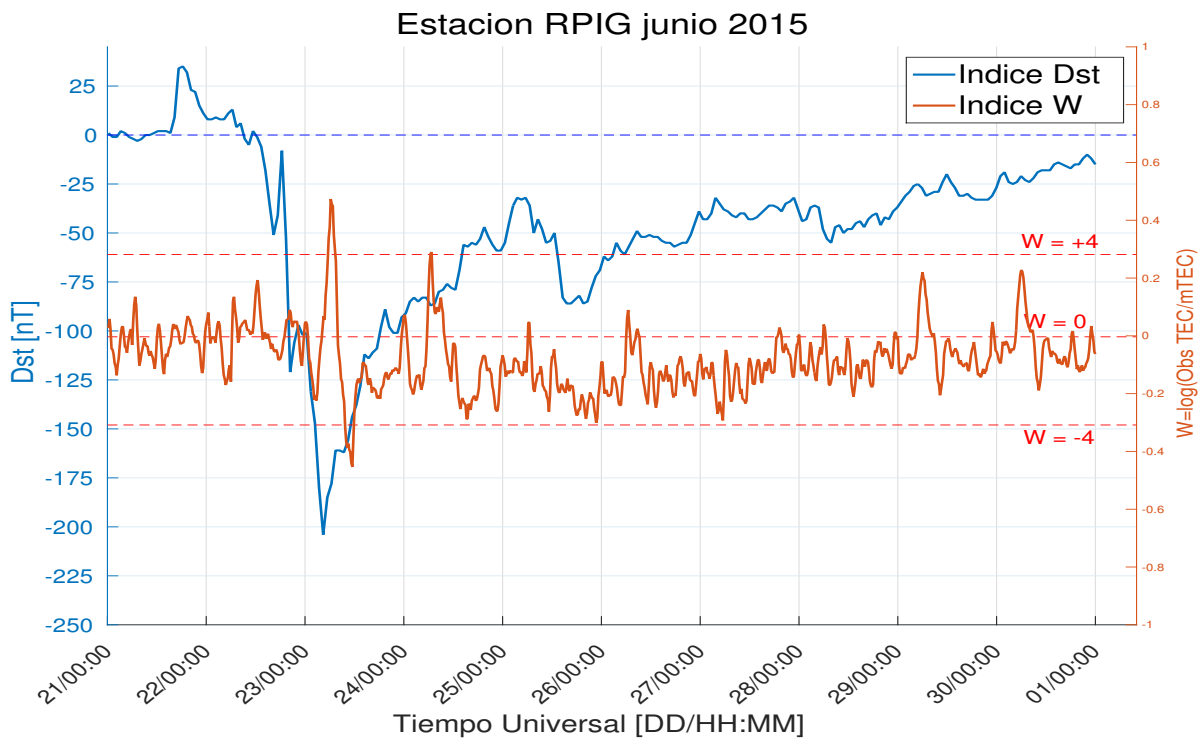


Fig. 41: Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

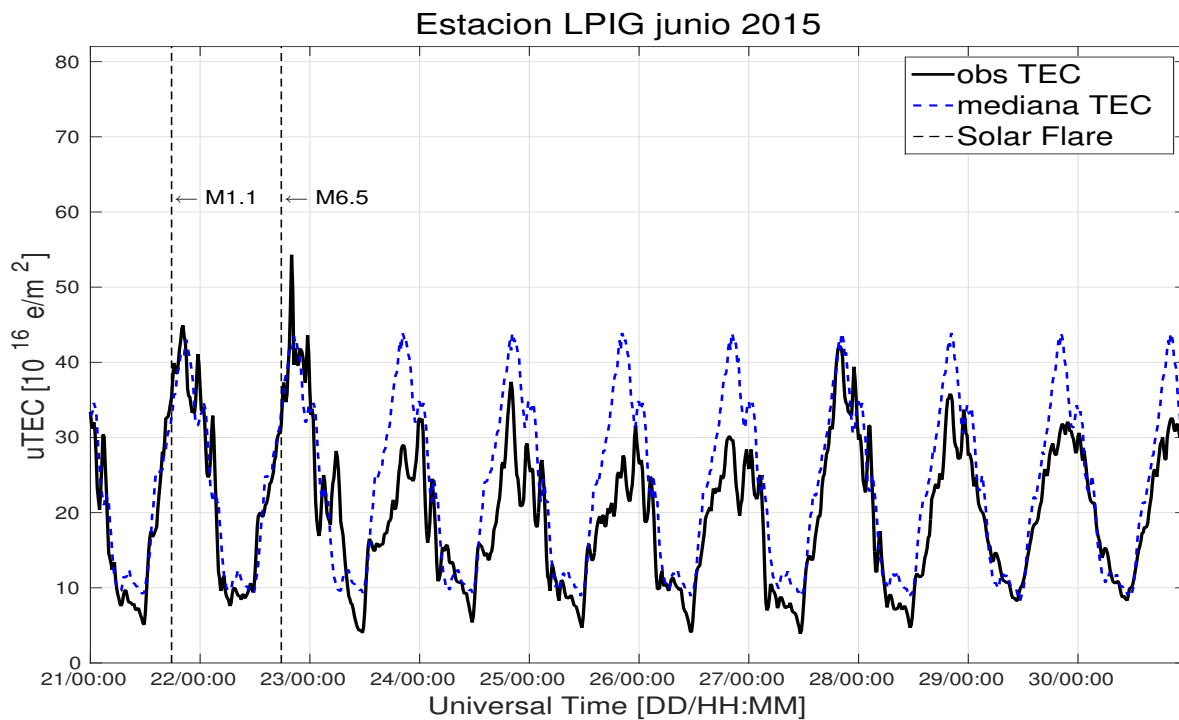


Fig. 42: Variación diaria del $v\text{TEC}$ comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

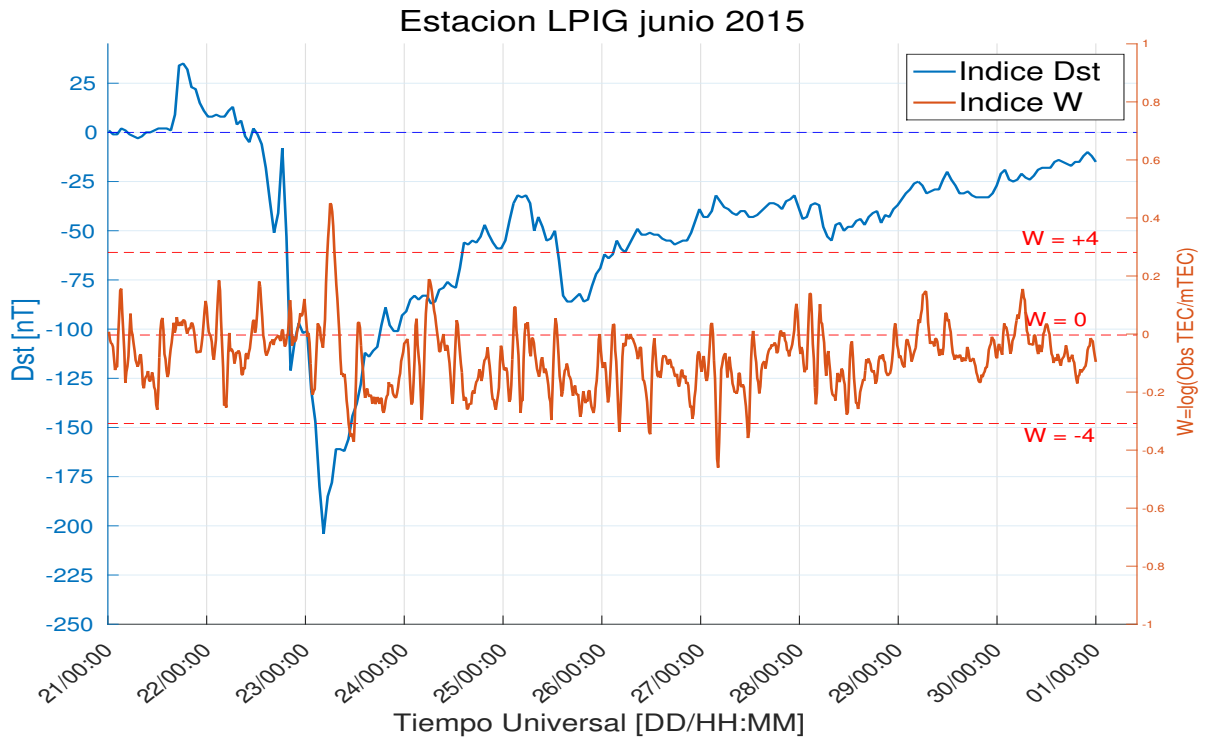


Fig. 43: Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

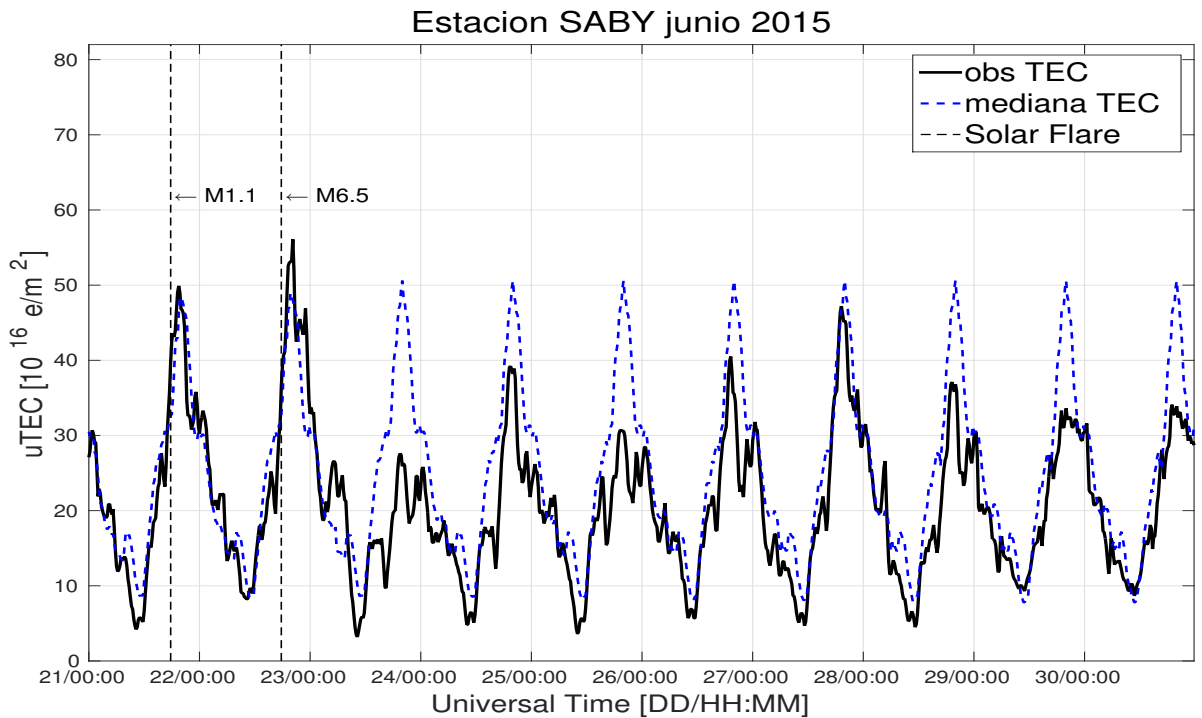


Fig. 44: Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

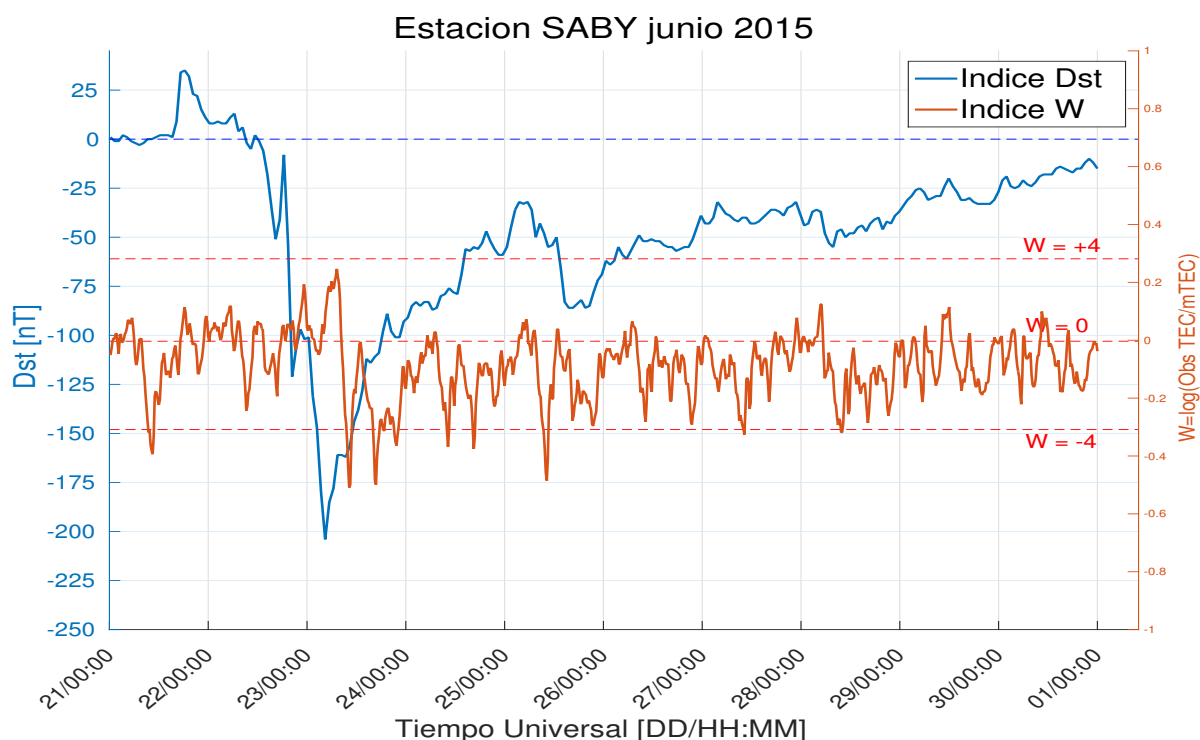


Fig. 45: Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

En resumen, el análisis de los mapas $vTEC$ reveló una perturbación positiva y tres más negativas bien localizadas mientras que el análisis utilizando la serie de tiempo W reveló la misma perturbación positiva W +4 sobre todas las estaciones. Al analizar las series de tiempo se encuentran similitudes en todas las estaciones, siendo que la perturbación es negativa principalmente durante la fase de inicio y recuperación. Por otro lado, algunas perturbaciones positivas fueron detectadas por estaciones al este y norte de México previo al mínimo Dst. Al norte del país, la estación MCIG encontró otras perturbaciones intensas al final del periodo.

4.3 EVENTO DEL 20 DE DICIEMBRE DE 2015

En el mes de diciembre del año 2015 ocurrió la última tormenta del año. Su fase de SSC comenzó a finales del día 19 alcanzando valores de hasta 43 nT. Después de 24 horas exactamente, durante la fase principal, los valores del índice Dst descendieron hasta -155 nT. Desde entonces, el campo geomagnético comenzó a recuperarse hasta alcanzar valores cercanos a cero a las 14:00 horas del día 24. Estas tres fases marcan el periodo a analizar para la ionosfera. Cabe mencionar que durante este periodo de la tormenta, no se registraron ráfagas solares de clase M o X. La causa de la tormenta fue debido a las eyecciones coronales que se muestran en la tabla 10 y su importante componente B_z sur dentro de ellas.

Regionalmente, la ionosfera sobre México presentó tres perturbaciones; tanto positivas como negativas intensas mostradas en la línea de tiempo de la gráfica 47. Las positivas se ubican alrededor del mínimo Dst. En cambio, la perturbación negativa ocurrió durante la fase de recuperación. La duración aproximada de estas perturbaciones fue entre los 45 minutos y 1:15 horas.

El comportamiento diario del plasma ionosférico sobre las estaciones MCIG y ZIHU se muestra en las figuras 46 y 49. Las diferencias máximas entre el $vTEC$ observado y la mediana a 27 días fueron de 29.4 TECu el día 20 a las 18:30 horas y de 32.2 TECu el día 20 a las 17:00 horas, respectivamente. Más adelante se menciona el porcentaje correspondiente respecto a la mediana

Fecha	Hora (UT)	Velocidad Lineal	Aceleración	E_k
dd/mm/aa	hh:mm:ss	[km/s]	[m/s ²]	[erg]
16/12/15	09:36:04	579	-6.7	3.9e+30
16/12/15	14:24:04	454	4.2	1.6e+31

Tabla 10: Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de diciembre de 2015.

vTEC. Así mismo, las diferencias mínimas fueron de -7.4 TECu el día 19 a las 16:00 horas y -9.9 TECu el día 23 a las 14:00 horas. La estación ZIHU además, registró varios picos dobles durante la variación diurna durante y después del mínimo de la tormenta. El más destacado es el del día 20 de diciembre sobre la estación ZIHU con valor de 40%. Estos picos dobles diurnos aparecen, incluso sobre las estaciones RPIG, LPIG y SABY (ver gráficas 51, 53 y 55) pero menos pronunciados (entre 20 y 37%). Al obtener las series de tiempo del índice W (ver 48 y 50) para cada estación, los máximos valores fueron: para MCIG el día a las horas DTEC = 0.53 (duración de 2 horas y media) y 0.56 para ZIHU el día a las horas, lo anterior corresponde a ~ 1.7 veces el valor observado con respecto a la mediana. Los valores mínimos obtenidos para las mismas estaciones fueron de DTEC = -0.3 el 24 a las 05:00 horas y DTEC = -0.39 el 20 a las 11:00 horas, respectivamente y corresponden a un ~ 0.67 veces el vTEC esperado. La amplitud de las series W para MCIG respecto a las de ZIHU, son menores. Sobre la segunda estación, se encontraron seis perturbaciones intensas positivas y seis negativas.

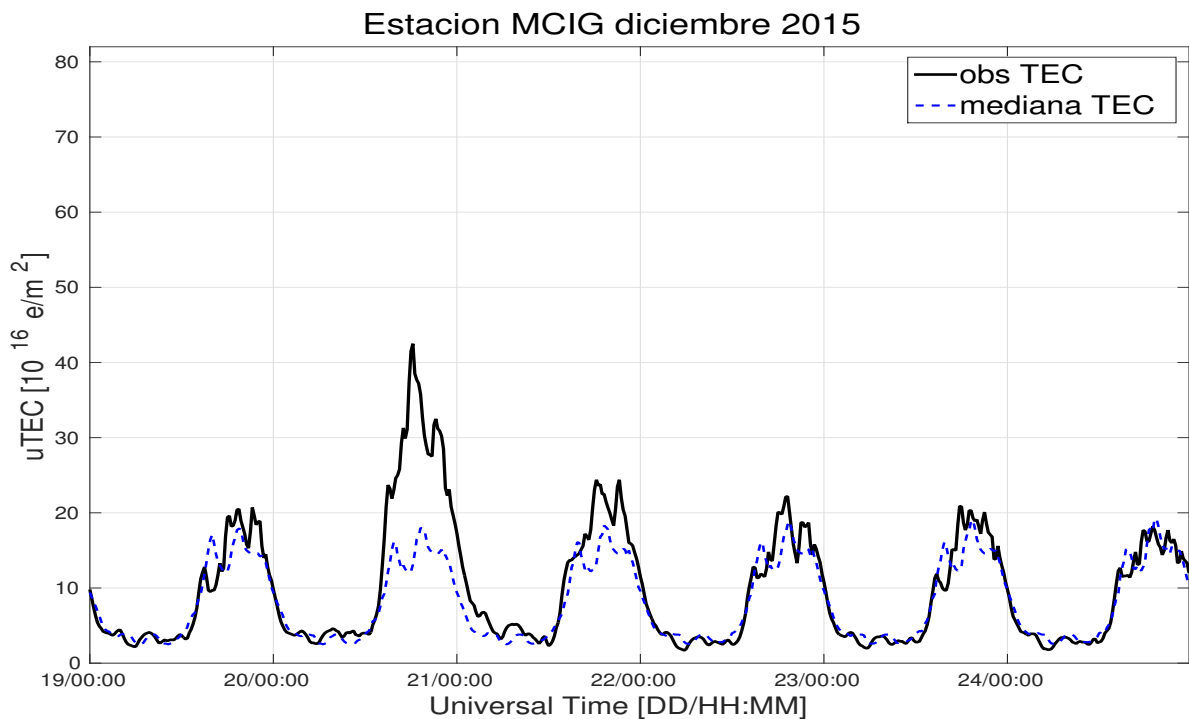


Fig. 46: Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

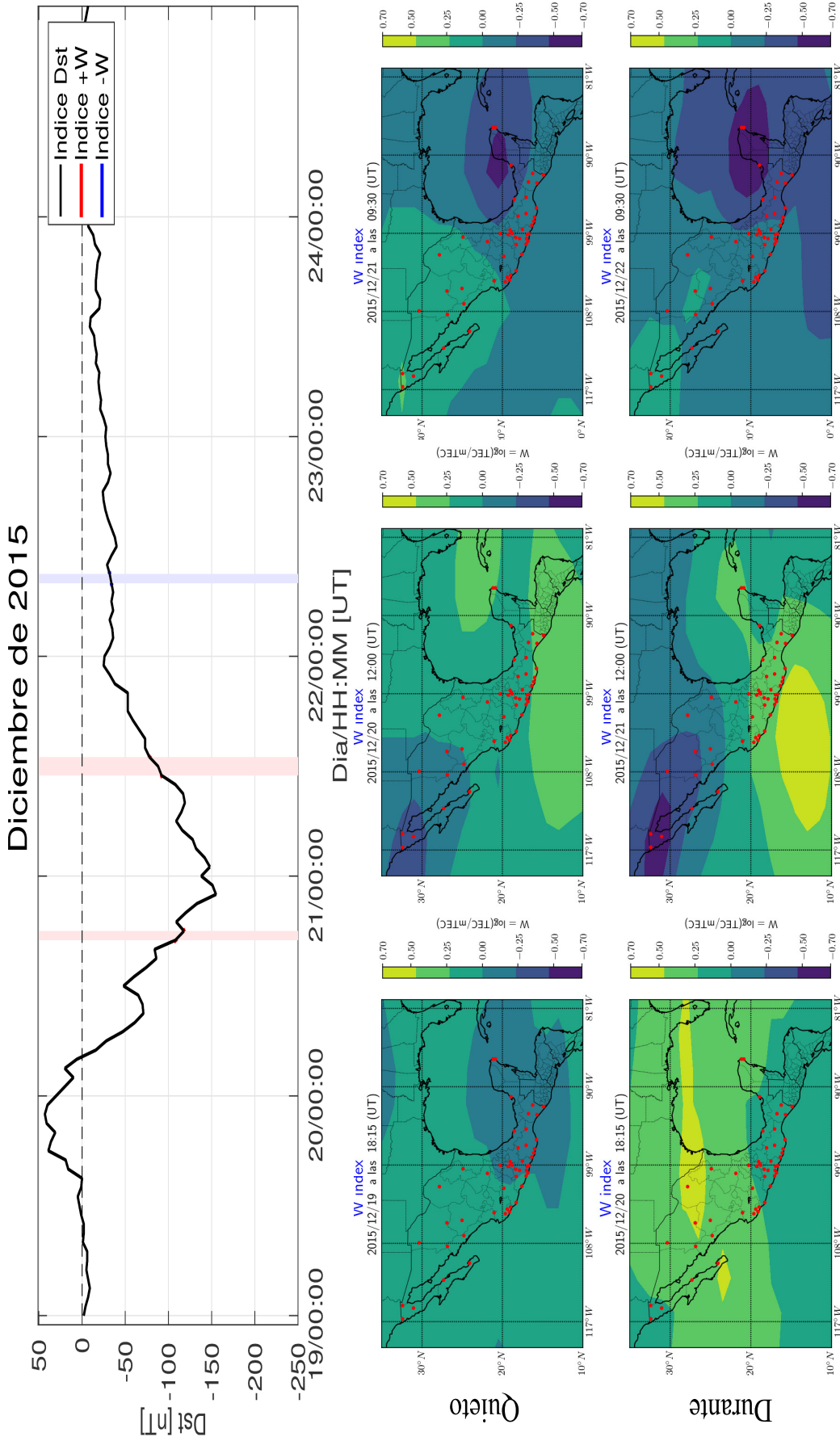


Fig. 47: Panel superior: Índice Dst durante la tormenta geomagnética de diciembre de 2015. La líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. Paneles inferiores: Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano.

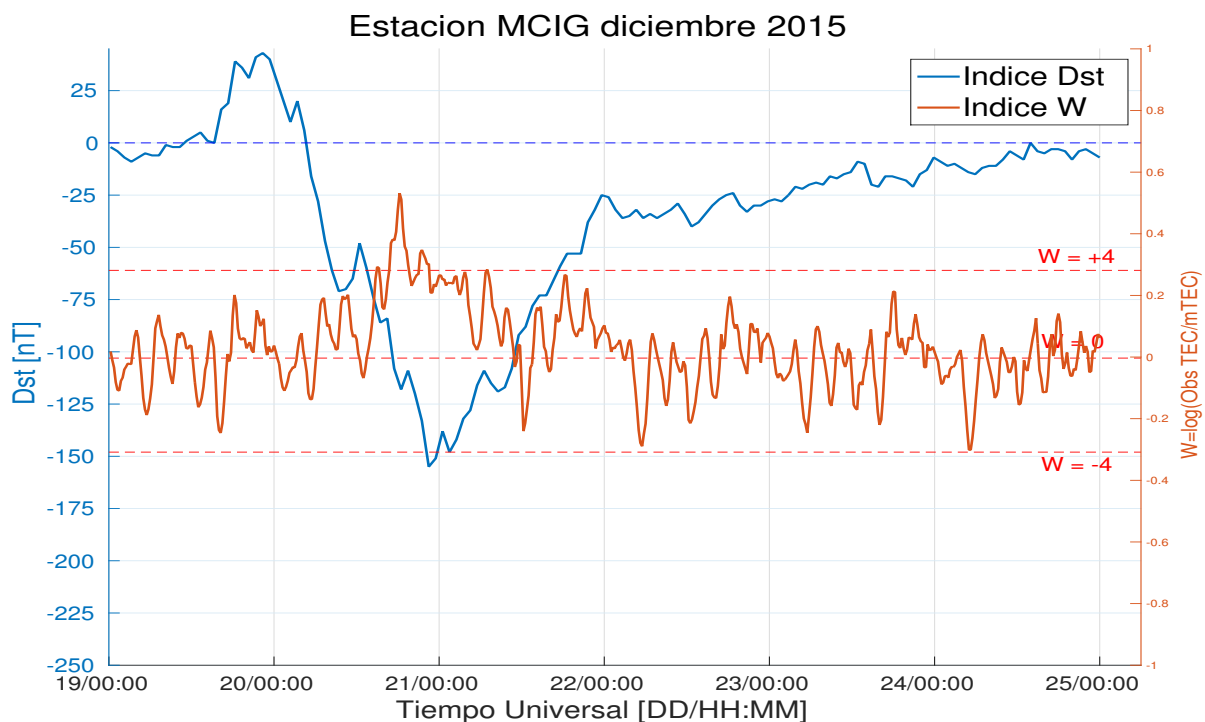


Fig. 48: Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

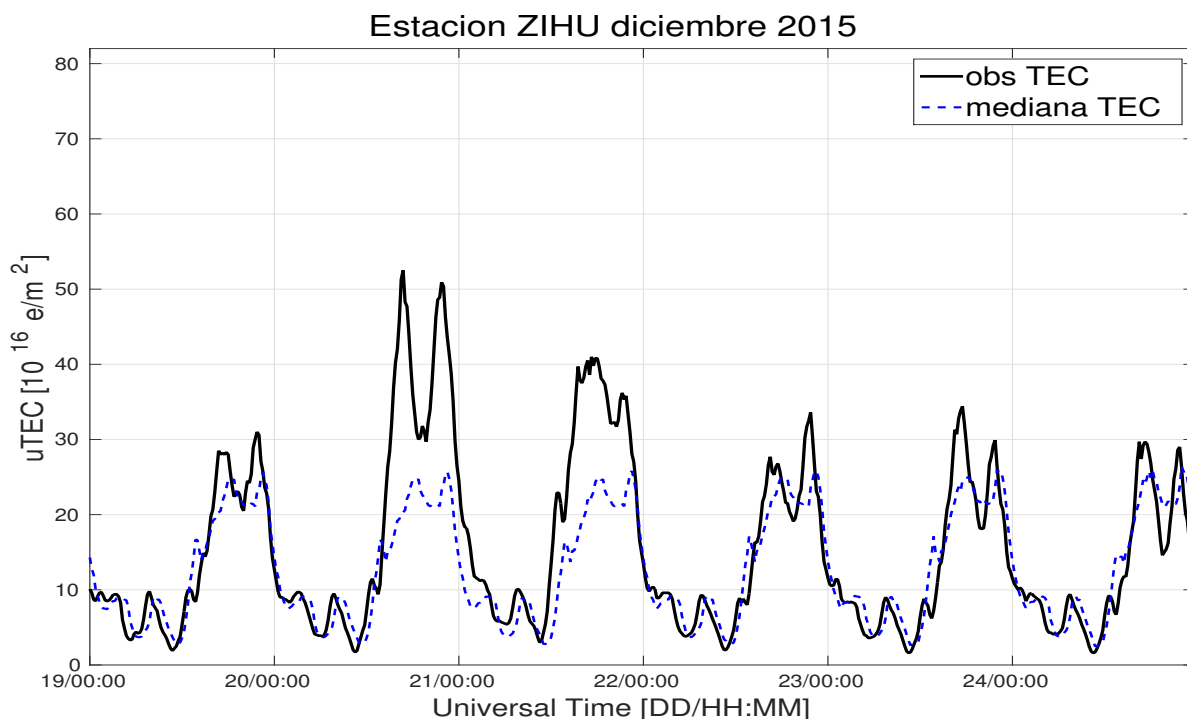


Fig. 49: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

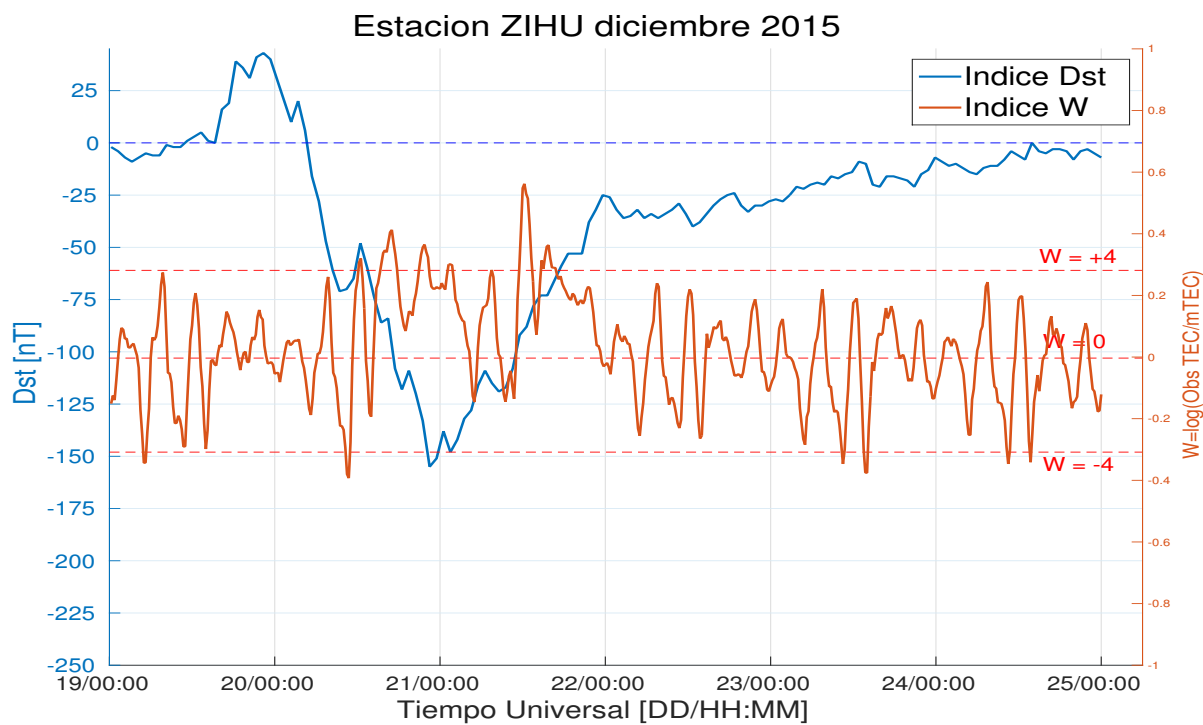


Fig. 50: Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

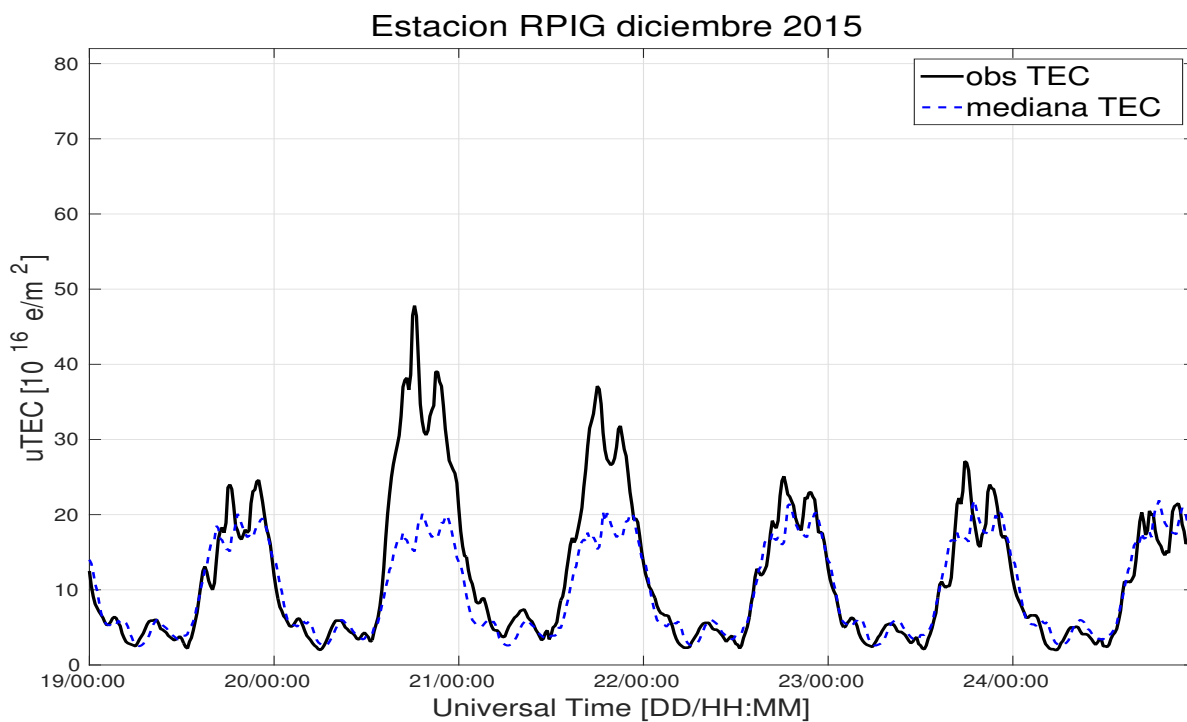


Fig. 51: Variación diaria del $v\text{TEC}$ comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

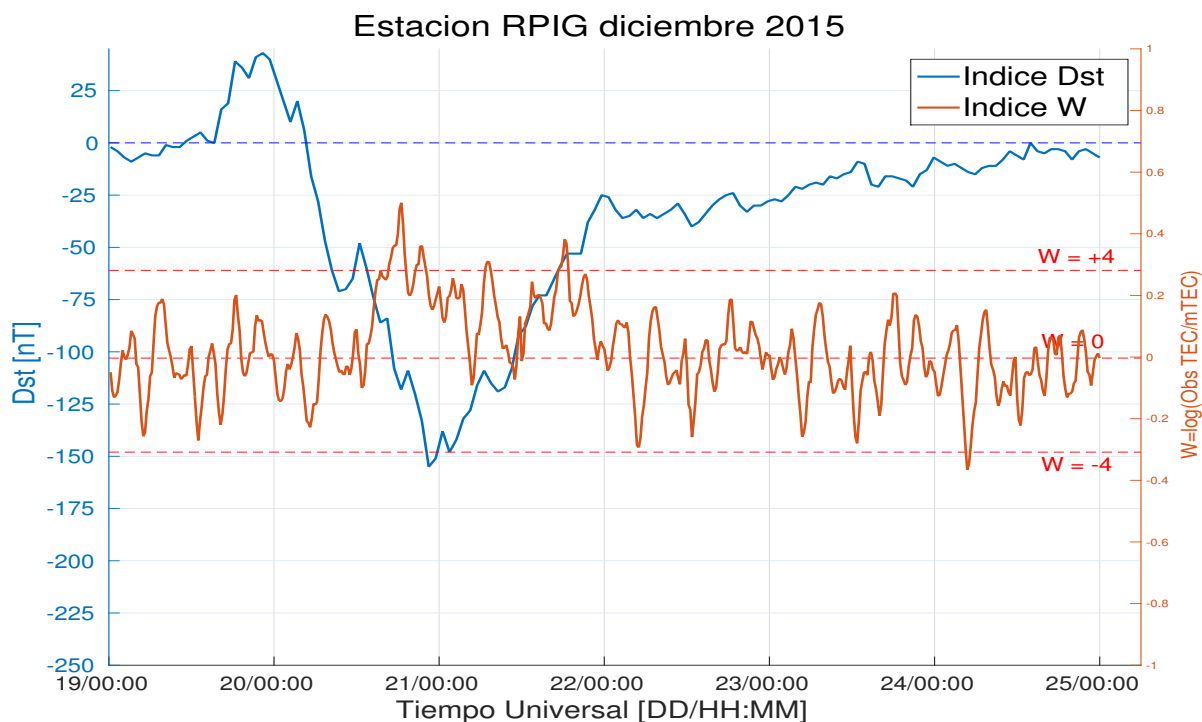


Fig. 52: Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

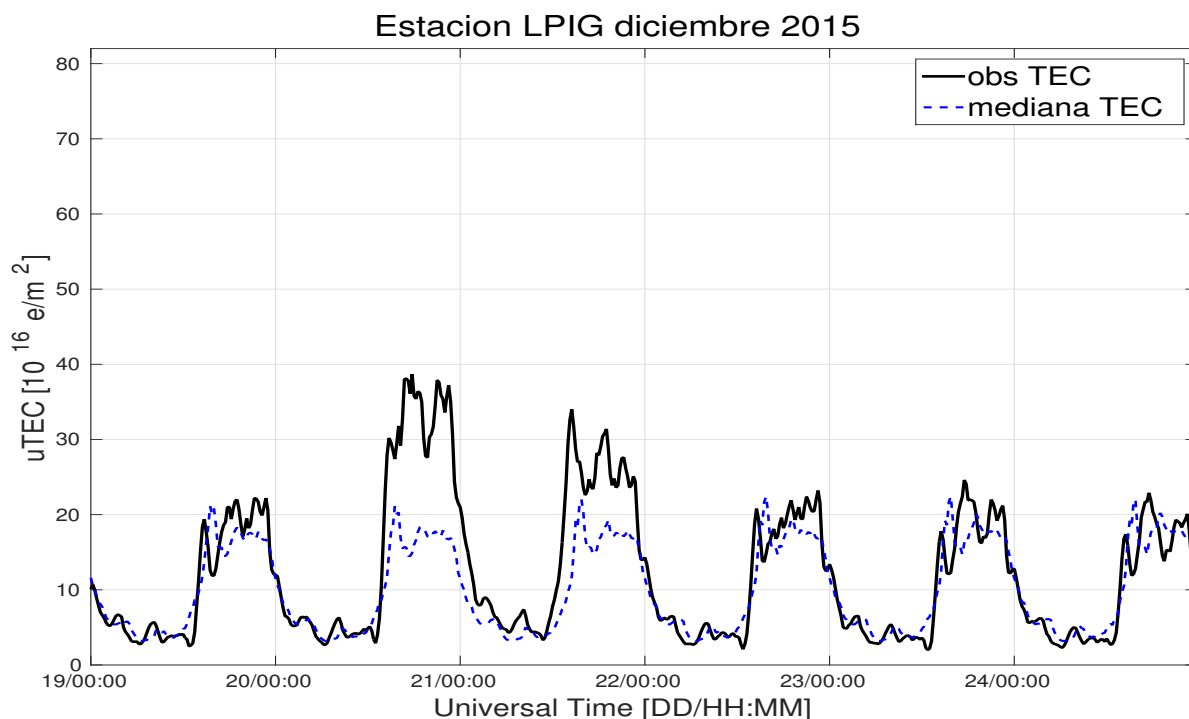


Fig. 53: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

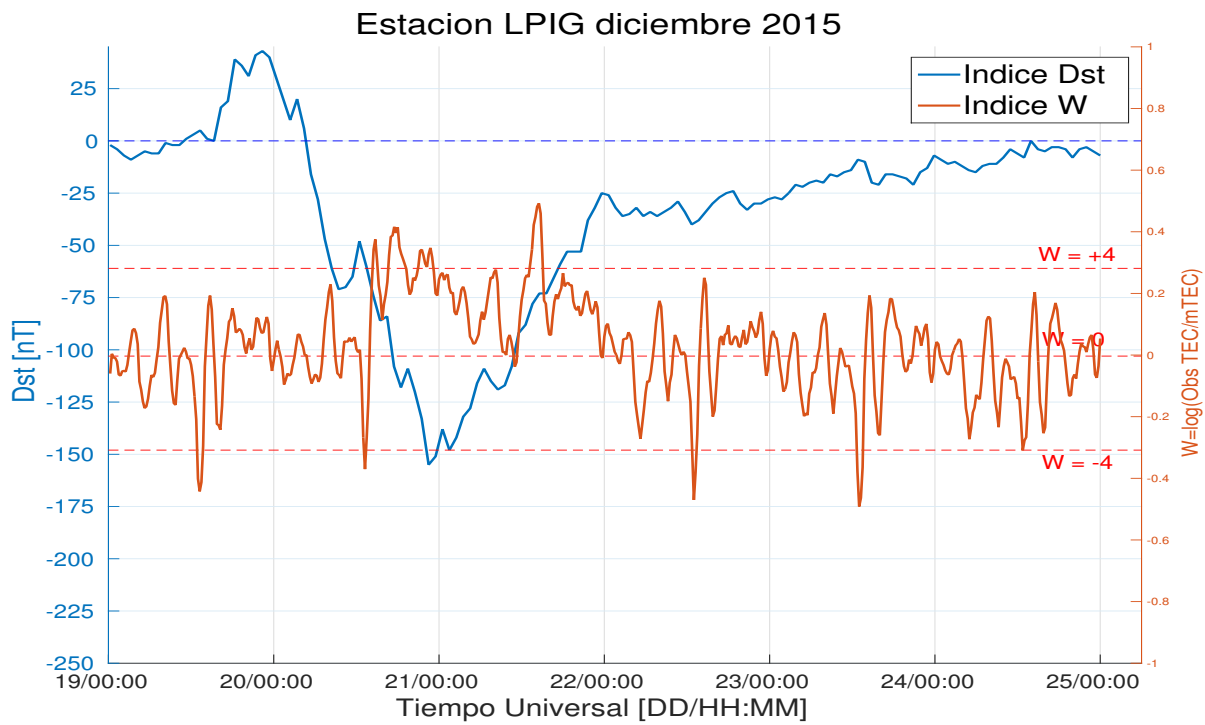


Fig. 54: Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

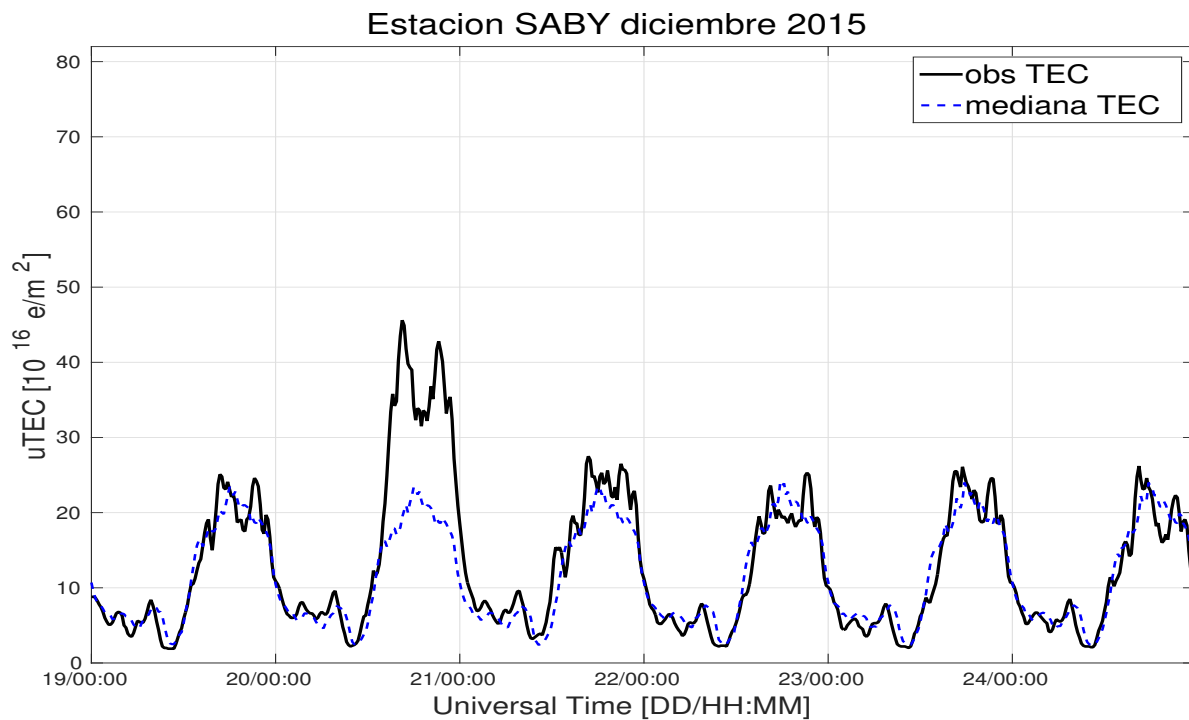


Fig. 55: Variación diurna del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

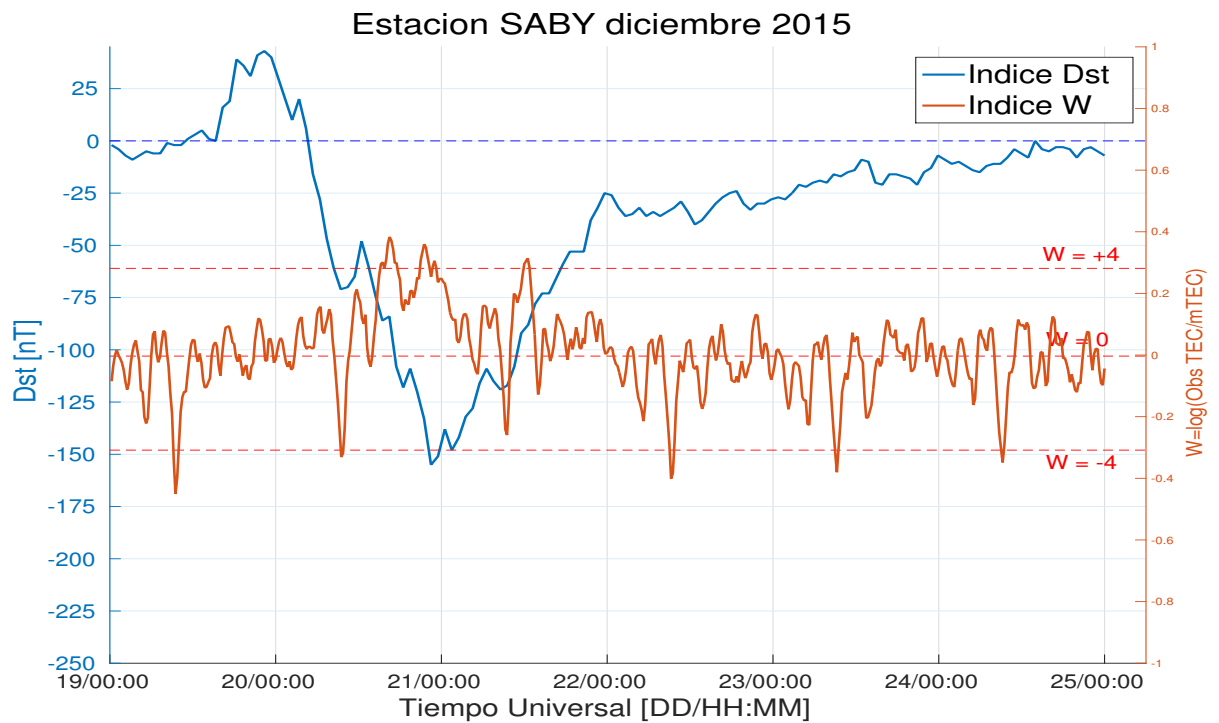


Fig. 56: Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

La variación $v\text{TEC}$ sobre las tres estaciones RPIG, LPIG y SABY en la misma componente horizontal magnética se ilustran en las figuras 51, 53 y 55. Las diferencias máximas encontradas para cada estación fueron 32.7, 23.8 y 26.2 TECu todas ellas el día 20 de diciembre a las 18:30, 18:00 y 17:00 horas, respectivamente. A través de las series de tiempo del índice W (ver 52, 54 y 56) se encontró la zona con mayor perturbación. De máximo índice W positivo alcanzado a máximo W negativo, la estación RPIG con DTEC = 0.5 que corresponde con la diferencia máxima (con duración de una hora), después la estación LPIG con DTEC = 0.49 el día 21 a las 15:00 horas y por último, SABY con DTEC = 0.38 el día 20 a las 16:00 horas. Cabe señalar además, que las tres estaciones rebasaron el umbral W +4 en varias ocasiones, alrededor del mínimo Dst. Por otro lado, los valores mínimos W para cada estación fueron DTEC = -0.36, DTEC = -0.49 y DTEC = -0.45, respectivamente.

Resumiendo este evento, la variación diurna $v\text{TEC}$ durante la fase de inicio revela perturbaciones positivas sobre todas las estaciones. En algunos casos, los niveles $v\text{TEC}$ fueron poco menos del doble esperado (ver ZIHU por ejemplo). Adicional a esto, se observaron picos dobles sobre la variación diurna para todas las estaciones excepto MCIG. Además, se encontraron varias perturbaciones positivas con W +4 alrededor del mínimo Dst para todas las estaciones. La estación con mayor valor W fue RPIG con DTEC = 0.5 y con el menor fue LPIG con DTEC = -0.49. A pesar de que la tormenta no fue la más intensa de las analizadas, si llegó a valores altos y bajos en el índice W pero además tuvo el mayor número de perturbaciones cercanas al mínimo Dst.

4.4 EVENTO DEL 26 DE AGOSTO DE 2018

La última tormenta geomagnética intensa ocurrió a finales del ciclo solar 24, en agosto de 2018. Su desarrollo comenzó desde la compresión de la magnetosfera el día 25 haciendo que el índice Dst alcanzara valores de 19 nT. Después de menos de 24 horas, en la fase principal, llega al mínimo Dst de -174 nT y finalmente comienza a recuperar sus valores cercanos a cero hasta el día 31 de ese mismo mes. La causa de esta tormenta fue la eyección de masa coronal que se muestra en la tabla 11 la cual por su fuerte componente B_z sur logró que el índice Dst cayera tan bajo.

Fecha	Hora (UT)	Velocidad Lineal	Aceleración	E_k
dd/mm/aa	hh:mm:ss	[km/s]	[m/s ²]	[erg]
20/08/18	21:24:00	309	-	-

Tabla 11: Eyecciones tipo Halo asociadas a la tormenta geomagnética del 26 de agosto de 2018.

En cuanto a ráfagas solares de clase M o X, no se encontró ninguna dentro de este periodo.

Los datos recopilados por la red del SSN solo se encuentran disponibles dentro del periodo que abarca desde finales de julio hasta el 28 de agosto de 2018, es decir, los últimos tres días del mes hicieron falta. Por lo que el análisis de esta tormenta consta únicamente de los tres días de la tormenta (25, 26 y 27 de agosto) y los respectivos 27 días previos para el cálculo de la mediana. Cabe mencionar que el procesamiento se realizó utilizando nueve estaciones.

La gráfica 57 muestra tres perturbaciones positivas encontradas durante la evolución del índice Dst. Dichas perturbaciones se encuentran tanto horas antes de la fase principal como días después, en la fase de recuperación. La duración de las mismas es de alrededor de una hora y se localizan principalmente al centro del país.

Al obtener los valores $vTEC$ y su mediana $vTEC$ para las estaciones MCIG y ZIHU se obtuvieron las gráficas 58 y 60. En ambos casos, se observan los valores $vTEC$ por arriba de su respectiva mediana $vTEC$ durante el periodo completo. Las diferencias máximas, para cada estación fueron de 24 y 30 TECu, mientras que las diferencias mínimas fueron de -4.4 y -12.5 TECu respectivamente. Lo anterior ocurrió durante el día 27 de agosto.

Por otro lado, las series de tiempo del índice W (ver figuras 59 y 61) para las estaciones MCIG y ZIHU muestran valores por arriba del umbral W +4. El valor máximo para MCIG fue de 0.38 a las 22:00 horas y de 0.29 para ZIHU a las 21:00 horas, ambos el día 27 de agosto.

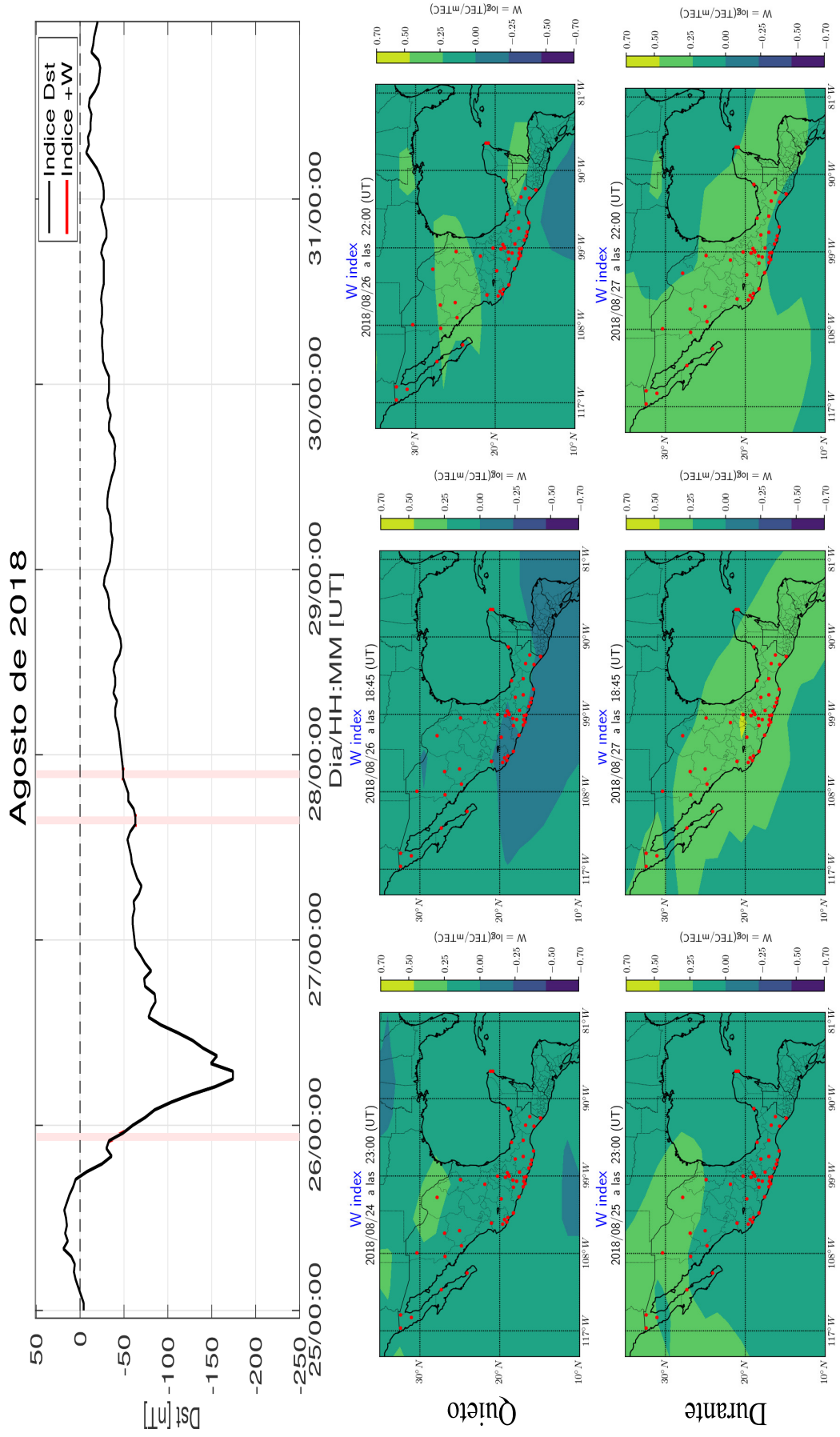


Fig. 57: **Panel superior:** Índice Dst durante la tormenta geomagnética de agosto de 2018. La líneas verticales representan el momento y la duración de una perturbación ionosférica intensa. **Paneles inferiores:** Comparación entre mapas del índice W quietos y durante las perturbaciones ionosféricas encontradas sobre territorio mexicano.

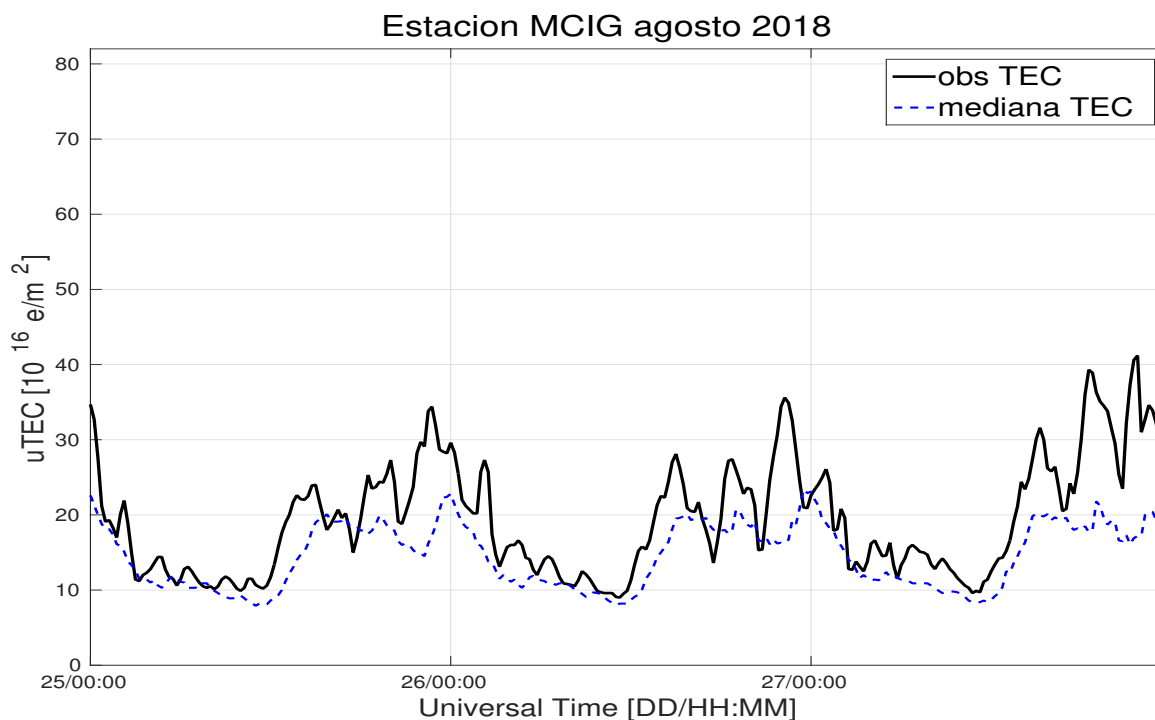


Fig. 58: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

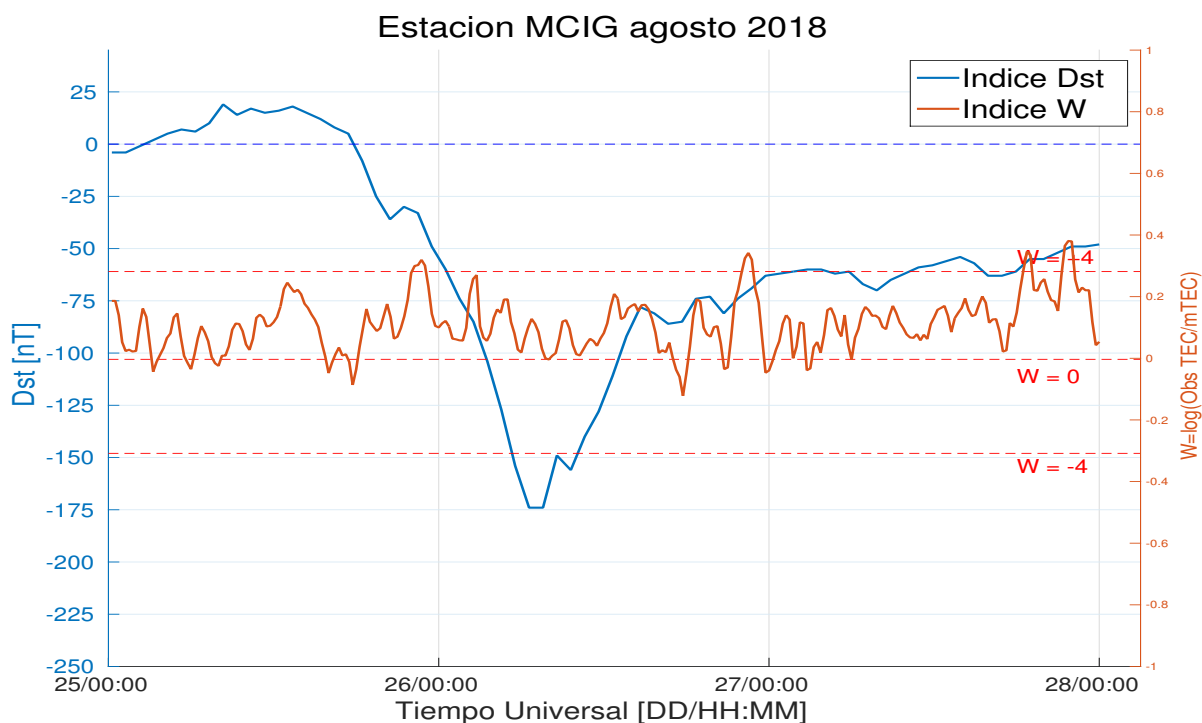


Fig. 59: Comparación entre los índices Dst y W para la estación MCIG durante la tormenta geomagnética.

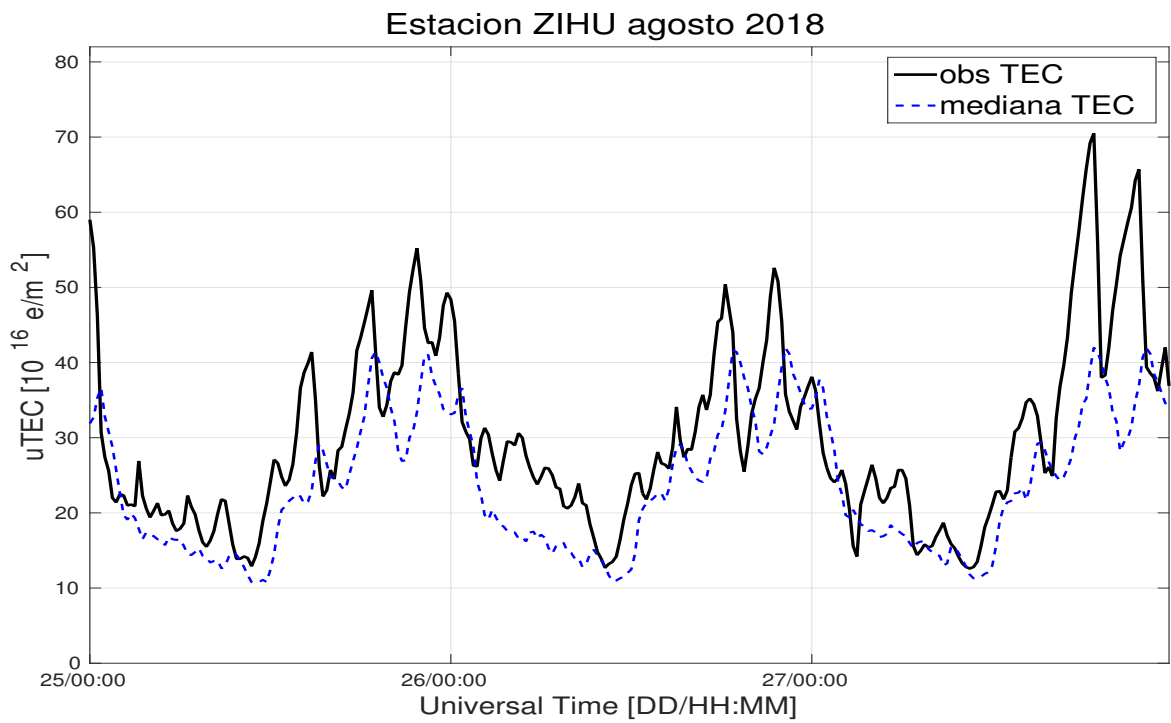


Fig. 60: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

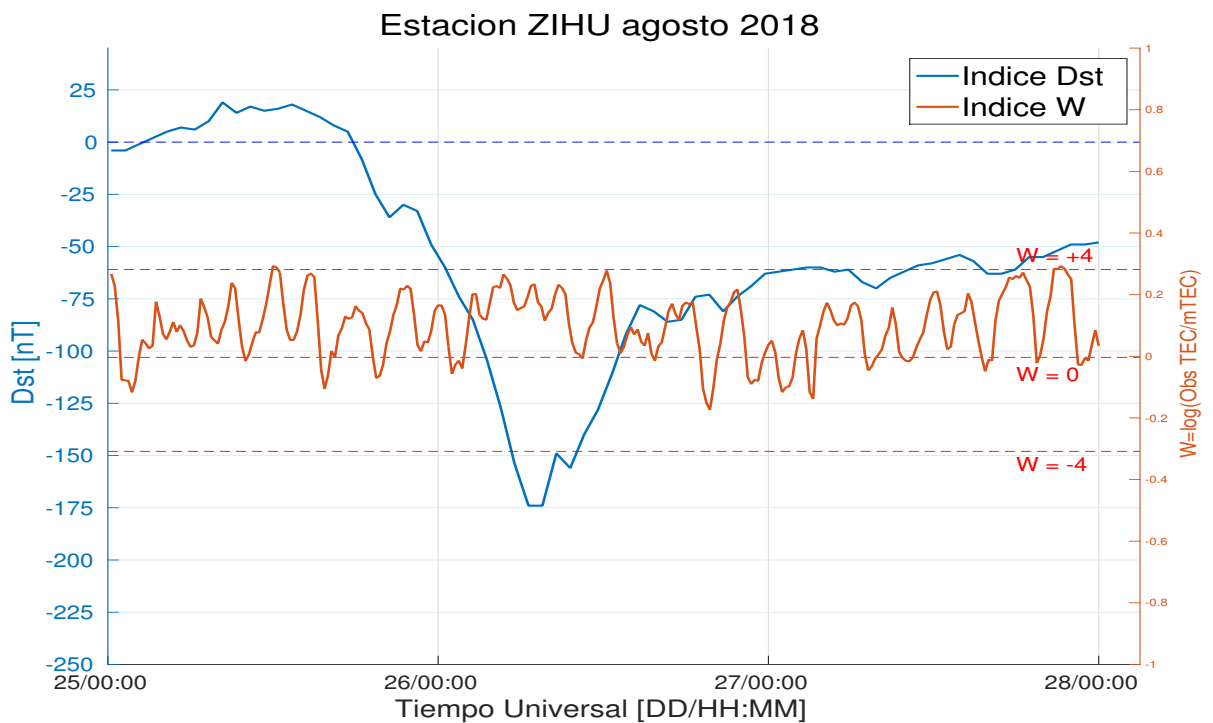


Fig. 61: Comparación entre los índices Dst y W para la estación ZIHU durante la tormenta geomagnética.

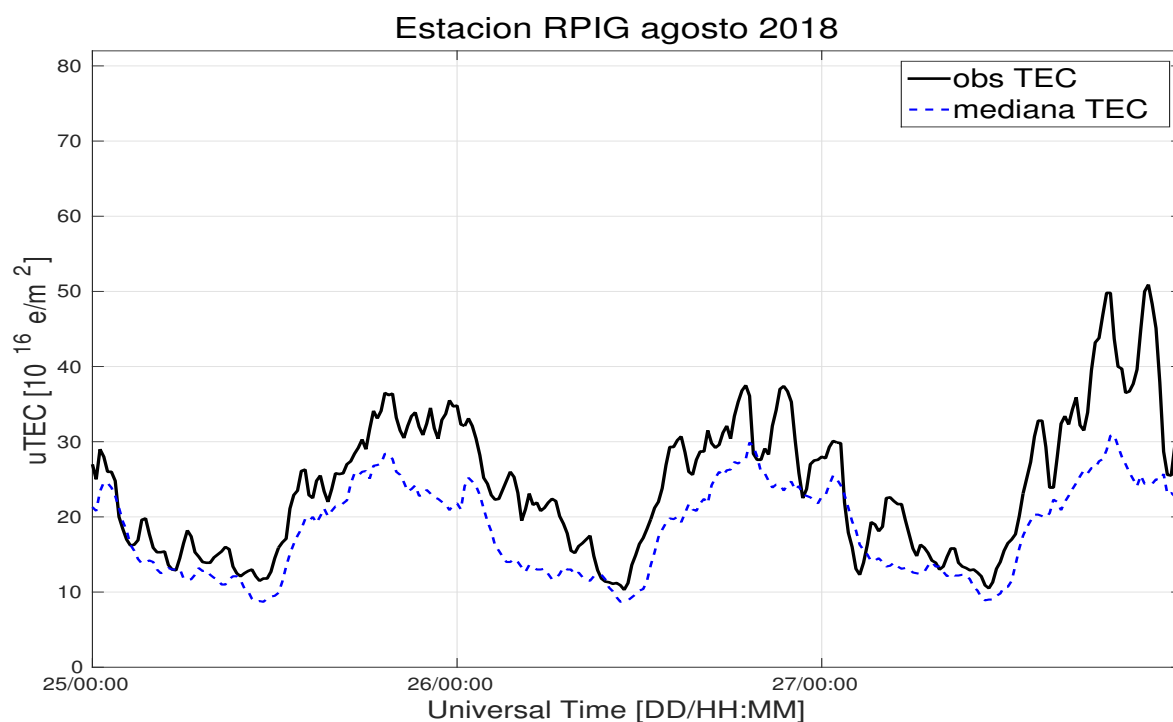


Fig. 62: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

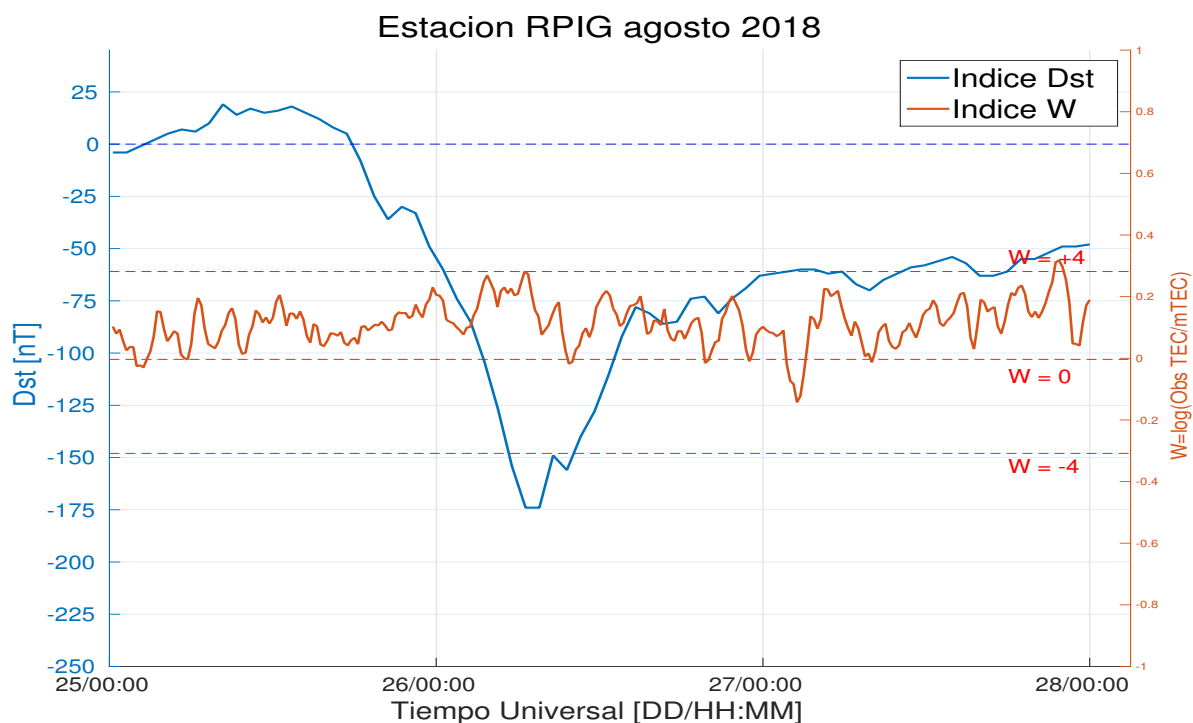


Fig. 63: Comparación entre los índices Dst y W para la estación RPIG durante la tormenta geomagnética.

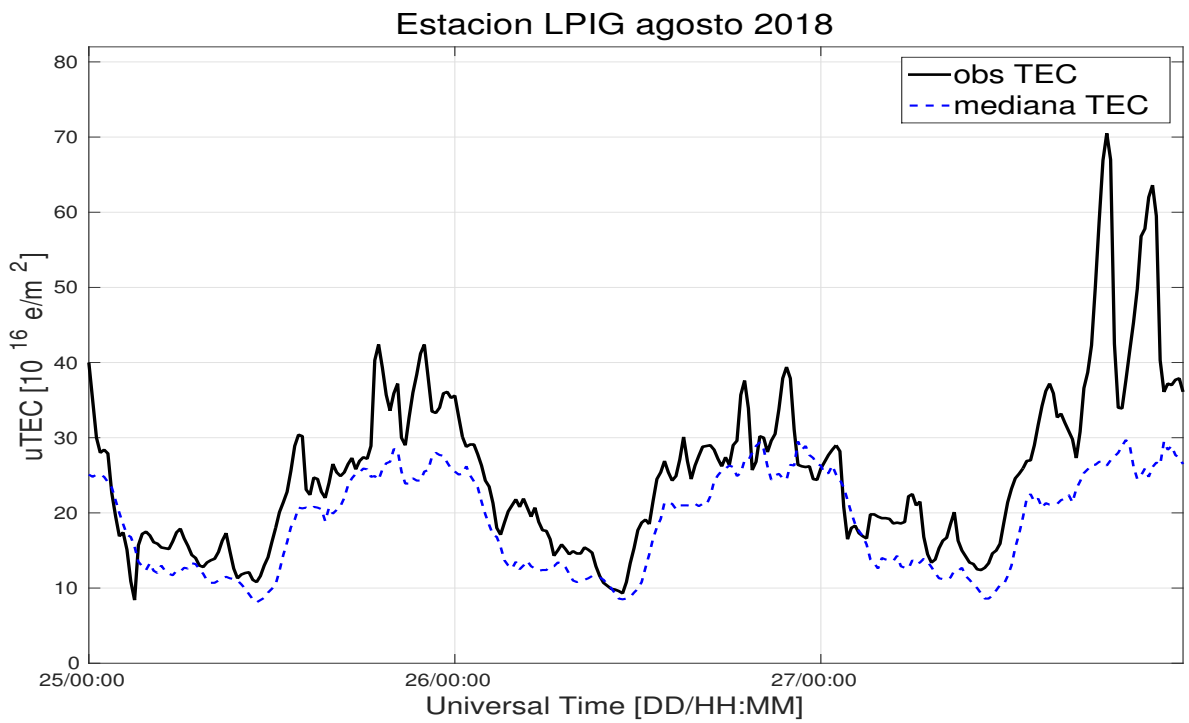


Fig. 64: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

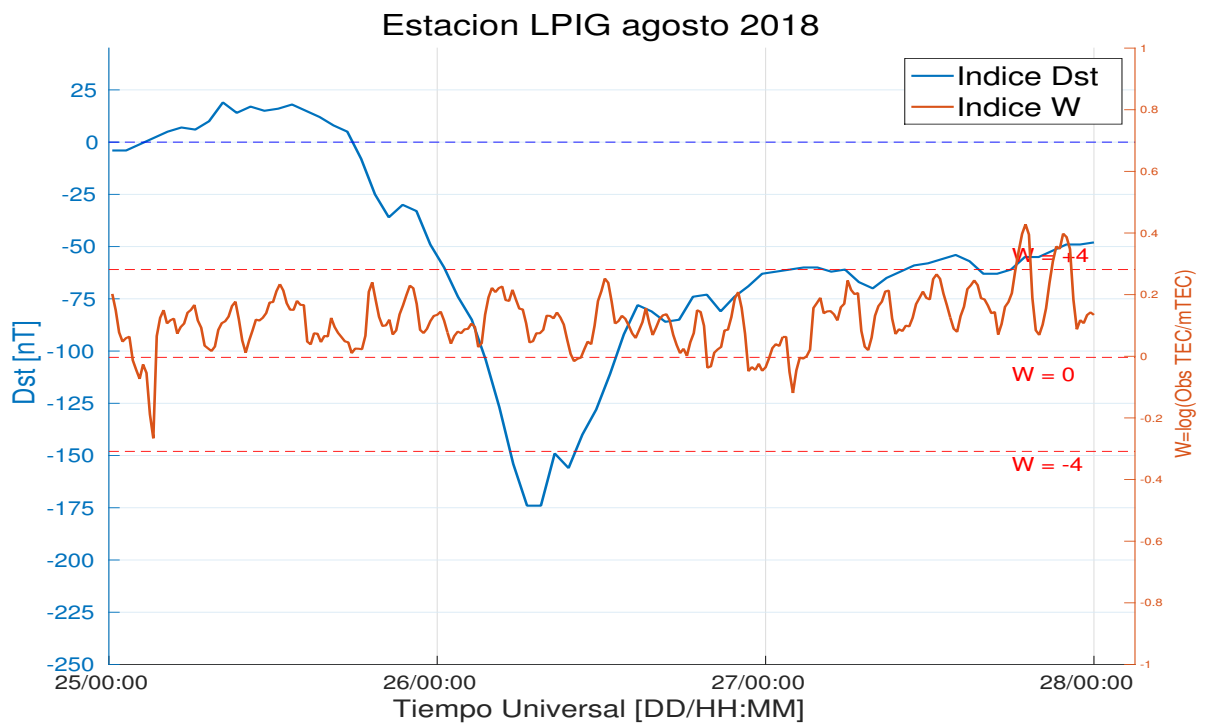


Fig. 65: Comparación entre los índices Dst y W para la estación LPIG durante la tormenta geomagnética.

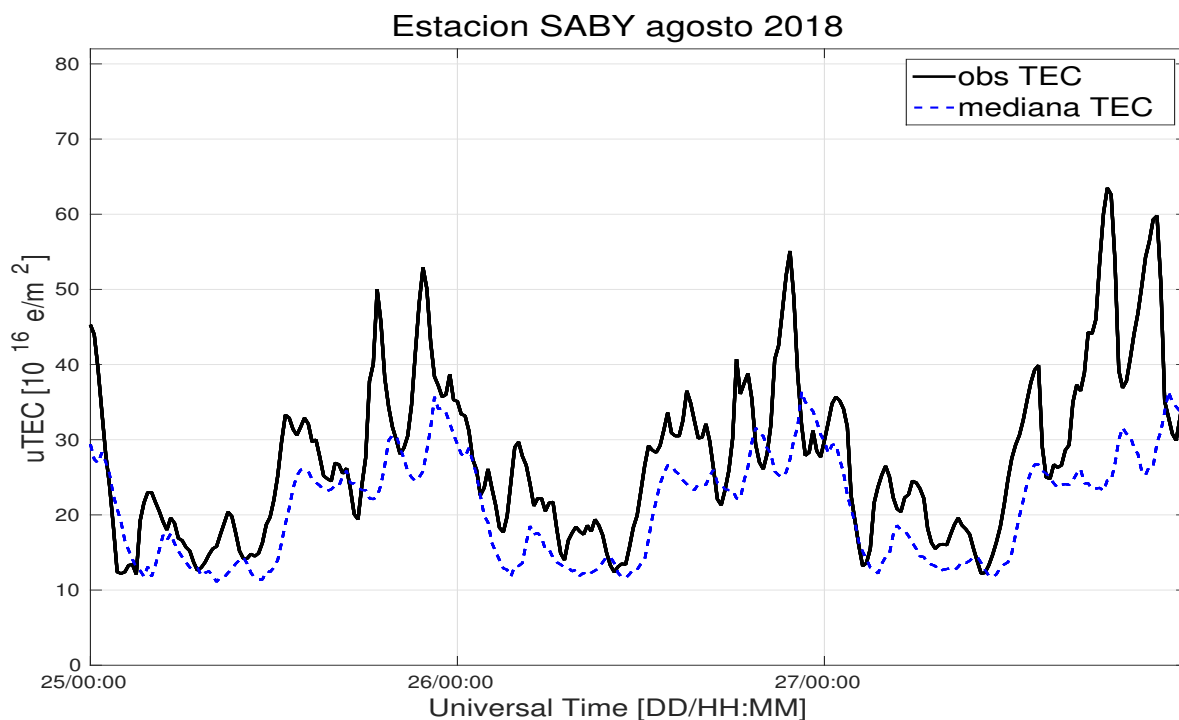


Fig. 66: Variación diaria del vTEC comparado con la mediana a 27 días, para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

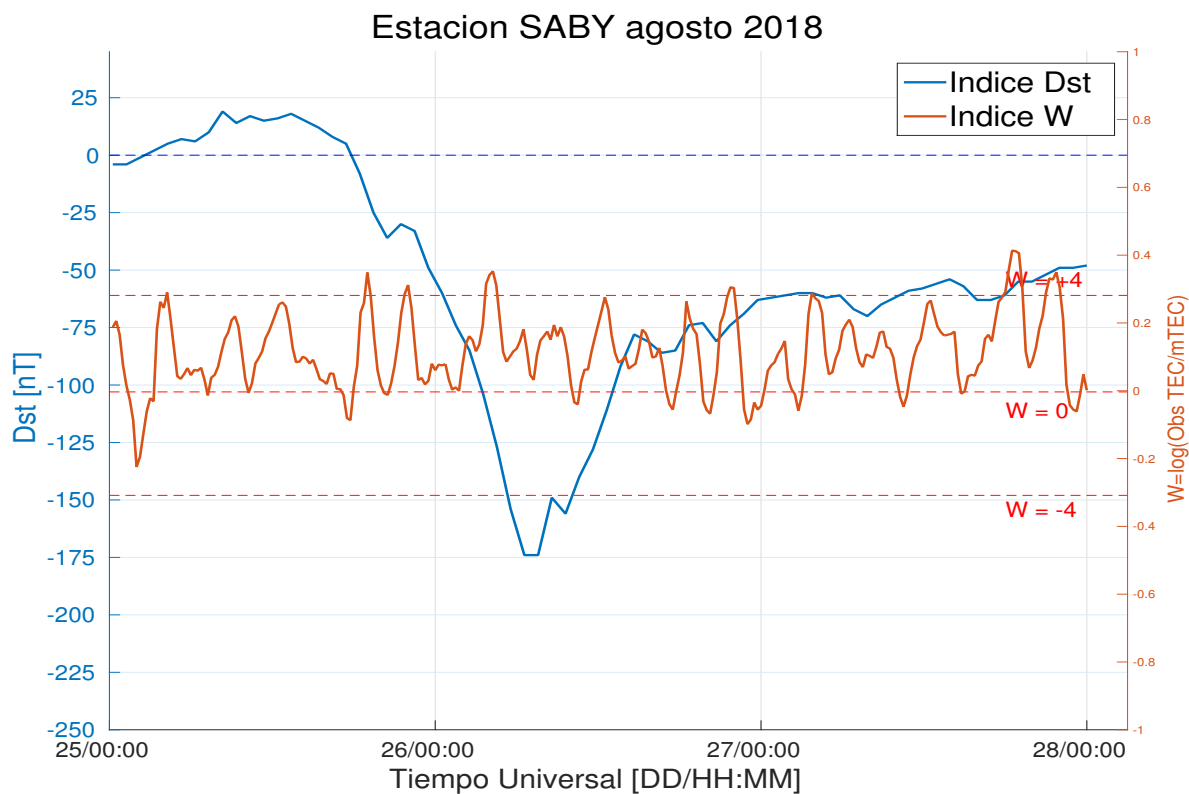


Fig. 67: Comparación entre los índices Dst y W para la estación SABY durante la tormenta geomagnética.

Respecto a las estaciones RPIG, LPIG y SABY con la misma componente horizontal de campo magnético, las gráficas 62, 64 y 66 muestran el comportamiento del valor $vTEC$ y su respectiva mediana $vTEC$. Las diferencias máximas entre estos dos valores fueron de 26.4, 44.2 y 38.9 TECu, respectivamente. Mientras que los valores mínimos fueron de -5.1 , -7.1 y -8.4 TECu. Además, se observó un marcado doble máximo diurno de 47% para la estación LPIG durante el 27 de agosto.

Por otro lado, el índice W de cada una de las estaciones, (ver gráficas 63, 65 y 67) todas ellas registraron su valor máximo durante el día 27 durante la fase de recuperación, es decir, más de un día después del mínimo Dst . La estación LPIG con 0.42 fue el valor más alto a las 19:00 horas, seguida por SABY con 0.41 a las 18:00 horas. La de menor valor de las tres fue RPIG con 0.31 a las 22:00 horas.

En términos generales, esta tormenta geomagnética fue la última intensa del ciclo solar 24. Su duración fue de 7 días desde el SSC el día 25 hasta el final de la fase de recuperación (el día 31 de agosto). Desafortunadamente, los datos del SSN sólo se tienen disponibles desde el 25 al 27 de agosto y de menos de 10 estaciones. Esto dificultó en gran medida el análisis de esta tormenta. Al obtener el $vTEC$ sobre las estaciones seleccionadas previamente se encontró que las estaciones MCIG y LPIG fueron las que registraron el índice W más alto. Así mismo, esta última estación registró un doble máximo diurno de 47% el día 27 de agosto. En su mayoría, la serie de tiempo W también reveló que las perturbaciones ionosféricas intensas se concentraron durante el día 27 de agosto, rebasando el umbral $W +4$ incluso en varias ocasiones.

Finalmente, la tabla 12 resume algunos de los valores (descritos a continuación) encontrados durante cada uno de los eventos analizados.

- (1) - $DTEC = \log \frac{obsTEC}{mTEC}$ Índice W ionosférico .
 (2) - $\delta = \frac{obsTEC - mTEC}{mTEC}$ Índice delta ionosférico.

Periodo de la TG	Fecha DD/HH:MM	D _{st} _{mín}	ID	Fecha DD/HH:MM	W _{máx}	$\delta^{(2)}$	Fecha DD/HH:MM	W _{mín} ⁽¹⁾
Marzo 2015	17/23:00	-222	MCIG	17/12:00	0.33	0.3	17/ 21:00	-0.36
			ZIHU	18/07:00	0.33	0.4	17/ 06:00	-0.22
			RPIG	17/13:00	0.54	0.4	18/11:00	-0.53
			LPIG	18/13:00	0.29	0.5	19/ 11:00	-0.24
			SABY	18/ 12:00	0.33	0.7	18/ 04:00	-0.23
Junio 2015	23/05:00	-204	MCIG	23/07:00	0.53	2.4	23/11:00	-0.44
			ZIHU	22/13:00	0.13	0.2	23/12:00	-0.43
			RPIG	23/06:00	0.47	1.9	23/11:00	-0.45
			LPIG	23/06:00	0.45	1.8	23/12:00	-0.37
			SABY	23/07:00	0.24	0.7	23/10:00	-0.50
Diciembre 2015	20/23:00	-155	MCIG	20/18:00	0.53	2.4	24/05:00	-0.24
			ZIHU	21/12:00	0.56	1.5	20/11:00	-0.39
			RPIG	20/18:00	0.50	2.1	24/04:00	-0.27
			LPIG	21/15:00	0.49	2.1	23/13:00	-0.44
			SABY	20/16:00	0.38	1.4	19/10:00	-0.45
Agosto 2018	26/07:00	-174	MCIG	27/22:00	0.38	1.4	26/19:00	-0.12
			ZIHU	27/21:00	0.29	0.9	26/20:00	-0.17
			RPIG	27/22:00	0.36	1.3	27/03:00	-0.14
			LPIG	27/19:00	0.42	1.5	25/03:00	-0.26
			SABY	27/20:00	0.41	1.6	25/02:00	-0.22

Tabla 12: Resumen con los índices Dst, W y δ con sus respectivas fechas, encontrados para las tormentas geomagnéticas intensas del ciclo solar 24.

4.5 RESULTADOS GENERALES Y DISCUSIÓN

En respuesta a las hipótesis iniciales, los resultados encontrados a través del desarrollo de este trabajo de investigación son los siguientes:

1. Se encontró que las mayores diferencias observadas entre los valores del vTEC y su mediana a 27 días, no ocurren exactamente durante la fase principal del índice Dst; sin embargo, si se observó que esos incrementos o disminuciones, que provocan una categoría intensa en el índice W, ocurren antes o después de dicho mínimo (fase principal de la tormenta).
2. En todos los casos, se encontraron cambios significativos en la variación del índice W sobre al menos una estación, durante los periodos de las tormentas. En ese sentido, se observó, a través de los mapas del índice W, que en junio del 2015 (ver gráficas 38 y 44), los nodos del vTEC ubicados cerca de las estaciones ZIHU y SABY (más cercanas al ecuador) se vieron mayormente afectadas por perturbaciones ionosféricas tanto positivas o negativas en dirección norte o sur. Esto debido a la expansión de la anomalía ecuatorial hasta latitudes medias (Zolesi, B. and Cander, L.R. [2014]).
3. Se observaron variaciones periódicas durante la noche en las series de tiempo W (por ejemplo ZIHU en marzo de 2015, ver figura 27), mismas que podrían estar asociadas a una mayor diferencia entre vTEC observado y su mediana vTEC y que el índice W no logra caracterizar eficientemente (por los niveles vTEC tan bajos durante la noche). Sin embargo, esto no ofrece ninguna prueba contundente aún y se necesitaría tener una estadística mayor para corroborarlo.
4. La estación con el mayor valor W positivo registrado fue ZIHU con DTEC = 0.56. Inversamente, el de mayor valor W negativo fue SABY con DTEC = -0.5. Su ocurrencia fue en diciembre y junio de 2015, respectivamente (ver tabla 12).
5. El evento cuya perturbación ionosférica intensa (según el índice W) tuvo mayor extensión regional, fue el de junio de 2015 (ver gráfica 35). El cual afectó a la parte centro del país alcanzando valores máximos de hasta DTEC = 0.54 unidades.
6. La mayor diferencia entre vTEC observado y su valor mediana vTEC fue registrada sobre la estación LPIG durante el mes de agosto de 2018 (ver gráfica 64) con un valor de 44.2 TECu. Por otro lado, la menor diferencia fue de -21 TECu sobre la estación MCIG para la tormenta de marzo de 2015 (ver gráfica 25).
7. Así mismo, se encontraron dobles picos diurnos o DDM en inglés (ver tabla 13) sobre varias estaciones (por ejemplo ZIHU en junio y diciembre de 2015, ver figuras 38 y 49) durante los días de la tormenta geomagnética. Estas observaciones son consistentes con trabajos como los de Pi, X., et. al., [1993] y Zolesi, B. and Cander, L.R. [2014], que han mostrado que estos picos pueden presentarse durante las tormentas geomagnéticas. Sin embargo, la estadística con la que se cuenta es insuficiente, debido a que estos dobles picos han sido observados también en las series de tiempo de la mediana (ver figuras 27 y 46), lo que indica que no son generados exclusivamente por las tormentas geomagnéticas, aunque quizás éstas los intensifiquen.

# Evento	ID	Fecha [dd/mm]	DDM
# 1	ZIHU	19/03	15 %
#2	MCIG	27 y 28/06	25 %
	ZIHU	23-27/06	23 – 40 %
	RPIG	24/06	33 %
	LPIG	26 y 28/06	33 y 17 %
	SABY	26 y 28/06	40 y 30 %
#3	ZIHU	19, 20, 22, 24/12	25 – 40 %
	RPIG	19-22/12	20 – 40 %
	LPIG	20 y 21/12	25 y 20 %
	SABY	20/12	26 %
#4	LPIG	27/08	47 %

Tabla 13: Porcentajes del doble pico diurno para cada una de las tormentas geomagnéticas intensas y las estaciones que los registraron.

8. A excepción del evento de marzo de 2015 (ver gráfica 24), las perturbaciones positivas se encontraron más cercanas al mínimo Dst. Las perturbaciones negativas, en cambio, se ubicaron en la fase de recuperación de la tormenta.

CONCLUSIONES

En esta tesis se analizaron los efectos sobre la ionosfera de México durante tormentas geomagnéticas intensas ($Dst \leq -150$ nT) del ciclo solar 24. Al utilizar los datos de la red del Servicio Sismológico Nacional se logró hacer un análisis cuantitativo y cualitativo sobre diferentes puntos geográficos. Lo innovador de este trabajo es la implementación de estas estaciones en el código US-TEC, con la finalidad de obtener como productos primarios los mapas vTEC y sus derivados como los mapas que caracterizan la mediana vTEC y que posteriormente fueron implementados para estudiar el comportamiento diurno de la ionosfera y diferenciarlo (a 27 días previos) de estados perturbados antes, durante y después al paso de una tormenta geomagnética haciendo uso de la definición del índice W (ver página 15).

El uso de los mapas vTEC e índice W, ofrecen una perspectiva única de la evolución espacial y temporal del paso de las tormentas geomagnéticas intensas sobre territorio mexicano. La creación de este producto permitió hacer un análisis regional en donde pueden observarse gradientes latitudinales y longitudinales para el parámetro vTEC. Por otro lado, ofrece el diagnóstico de que los mapas TEC por sí solos, no son suficientes para el estudio de las perturbaciones ionosféricas, sino que es necesario hacer una comparación entre los días previos. Por esto, la construcción de los mapas vTEC, mediana TEC e índice W parecen ser una herramienta prometedora para el estudio del clima espacial sobre territorio mexicano (Sugiura, M., and S. Chapman [1960]).

Trabajos como Matsushita, S., [1959] han establecido que la respuesta de la región F a tormentas geomagnéticas están caracterizadas por una fase positiva en la densidad de electrones, previa a una perturbación negativa (en comparación con días quietos). Siendo las tormentas positivas más comunes a latitudes bajas y ecuatoriales. Aunque esta característica está estrechamente ligada a las condiciones de la tormenta geomagnética como el tiempo, la intensidad, el tiempo local, así como la posición de la estación y la época del año en que se observe Buonsanto, M.J., [1999], Martyn, D. F. [1959]. Particularmente, se ha encontrado que el incremento o disminución de la proporción O/N₂ sobre la atmósfera afecta el incremento o disminución de la densidad de electrones sobre México. Además, las perturbaciones ionosféricas positivas son una característica común en la región de México no necesariamente ligada a las tormentas geomagnéticas (Sergeeva et al., [2017]). Por otro lado, las perturbaciones positivas o negativas pueden estar controladas por la anomalía ecuatorial (De la Luz et al., [2018]). Los efectos de las tormentas geomagnéticas sobre la ionosfera son visibles alrededor del mínimo Dst (López-Montes R., [2010], Ibarra Ortega H., [2016]).

En este trabajo, a través de los mapas W, se detectó que la mayoría de las perturbaciones ionosféricas intensas positivas ocurrieron alrededor del mínimo Dst mientras que las perturbaciones positivas intensas sucedieron en la fase de recuperación (Gulyaeva, T. L., and I. Stanislawska [2008]). La estación ZIHU fue la que registró un mayor índice W debido principalmente a la expansión de la anomalía ecuatorial (Cipagauta-Lara E., [2007]). A su vez, se encontraron dobles picos diurnos sobre algunas estaciones durante el periodo de actividad geomagnética (Pi, X., et al., [1993]).

Algunas de las características más destacadas durante el análisis de las cuatro tormentas geomagnéticas queda resumido en la siguiente lista:

1. Se encontraron perturbaciones ionosféricas positivas y negativas intensas durante el paso de las tormentas geomagnéticas intensas sobre territorio mexicano. La mayoría de las

perturbaciones positivas ocurrieron durante las primeras horas de la fase principal y posteriormente, las perturbaciones negativas, en la fase de recuperación (ver tabla 12).

2. Según el número de eventos tratados, no se encontró una relación entre el mínimo índice Dst de las tormentas geomagnéticas que provocan el máximo índice ionosférico W. Lo anterior, se ve reflejado principalmente en la tormenta geomagnética más intensa (marzo de 2015) y la menos intensa (diciembre de 2015). Siendo esta segunda la que presentó valores más altos del índice ionosférico positivos de hasta 0.56 y negativos de -0.45 unidades. Lo anterior corresponde a 1.7 y 0.6 veces el valor vTEC esperado (respecto a la mediana TEC), respectivamente.
3. En el caso del índice δ , se encontraron valores más altos durante la tormenta geomagnética de diciembre de 2015, que coinciden con los valores más altos en el índice W positivo. La estación MCIG registró valores de hasta 2.4 unidades.
4. Se considera que la variación estacional sobre la ionosfera de México, con niveles de vTEC menores a 30 TECu fue la más propensa a perturbaciones ionosféricas intensas (ver evento de diciembre de 2015). Aunque se sabe que esta característica diurna predomina sobre esta región y no existe una dependencia con factores externos de clima espacial (Sergeeva et. al., [2017]).
5. No fue posible discernir los efectos de las fulguraciones solares intensas utilizando los intervalos de cálculo de vTEC cada 15 minutos y la mediana TEC a 27 días previos.
6. El efecto de doble pico diurno estuvo presente, al menos en una estación, durante el periodo de las tormentas geomagnéticas intensas. El evento de junio de 2015 fue el que registró un mayor número de días con esta anomalía y cuyo registro aparece en la serie de tiempo TEC sobre todas las estaciones. Principalmente, sobre la estación ZIHU, más cercana a la región ecuatorial. Sin embargo, el doble pico diurno más sobresaliente se registró durante la tormenta geomagnética de agosto de 2018, por la estación LPIG con un DDM de más de 40% en cada pico diurno. Lo anterior es consistente con trabajos como Pi, X., et. al., [1993] y Zolesi, B. and Cander, L.R. [2014].

5.1 TRABAJO A FUTURO

Se reconoce que este análisis tiene varias limitantes; ya que solo se consideró el ciclo solar 24 que coincide con la liberación y libre acceso a la base de datos del SSN (a partir del 2011), las cuatro tormentas geomagnéticas intensas encontradas no proveen de suficiente información para determinar los factores que generan una perturbación ionosférica intensa, principalmente a latitudes como las de México. La elección de los eventos en el ciclo solar 24 obedece a la disponibilidad de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), ya que una de las prioridades del LANCE es el uso de estos datos en tiempo real. Queda claro que hace falta llevar a cabo una estadística mayor con eventos de otro ciclo (como el ciclo 23) pero dado que no se cuenta con datos históricos del SSN para este ciclo, será necesario hacer uso de datos de otras redes como TlaLocNet, UNAVCO o CORS.

A continuación se mencionan algunas cuestiones y análisis pendientes que se pretenden realizar a futuro.

- En México, el número de estaciones GPS disponibles para el monitoreo de la ionosfera ha ido en aumento en los últimos años. Esto nos permitirá tener una mayor cobertura dentro de la malla vTEC y llenar zonas donde no se tienen estaciones. A consecuencia, existe la

posibilidad de una malla con mayor resolución espacial. Actualmente, utilizando la red del SSN se observan estructuras de gran escala. Aunque se tiene que tener en cuenta que las observaciones con el cálculo de US-TEC no siempre son confiables debido a la distribución uniforme de las estaciones sobre la región.

- Para complementar, se debe agregar al análisis, las tormentas geomagnéticas de menor intensidad del ciclo solar 24 para tener una mayor estadística o tomar las tormentas geomagnéticas intensas de varios ciclos solares. Lo anterior, con el propósito de encontrar alguna relación entre los índices Dst y el índice W.
- Realizar el cálculo de la variación estacional y anual vTEC para aprovechar la base de datos actual del SSN.
- Someter cada uno de los archivos observacionales de entrada a un análisis automatizado de calidad de datos que nos permita determinar el grado de confiabilidad de las mediciones. Actualmente existen herramientas como *gipsy* y *teqc* que pueden realizar esta operación. Al hacerlo, se refinarán los mapas vTEC y disminuirá la incertidumbre en el cálculo con tal certeza que se podrá determinar, de mejor forma, si el TEC observado está asociado a la tormenta y discernir de una posible falla del instrumento mismo.
- Lograr una descripción más detallada del sistema magnetosfera-ionosfera durante las tormentas geomagnéticas intensas. Esto requeriría observaciones adicionales con distintos instrumentos como las ionosondas, las cámaras All Sky y hasta detectores de GICs (corriente geomagnéticas inducidas). Actualmente, el equipo mencionado está en proceso de adquisición e instalación. Se pretende que los datos estén listos para la investigación en los próximos años.
- Una de las piezas clave para el siguiente ciclo solar será también el estudio de datos provenientes de ionosondas, las cuáles serán instaladas en breve en varios puntos del territorio mexicano por parte del equipo del LANCE.
- Con los elementos aquí presentados, no se logra aún explicar algunos fenómenos observados en algunas de las series vTEC como los picos múltiples registrados por algunas estaciones (ver gráfica 62) o los incrementos leves de densidad durante la noche (ver gráfica 49). Sin embargo, se tiene el interés sobre los mismos como futuros temas de investigación utilizando parte de los instrumentos antes mencionados.
- De acuerdo a lo anterior, se hace énfasis en fortalecer la alianza de colaboración y desarrollo computacional entre los laboratorios LANCE y LACIGE para la automatización de los mapas vTEC y mapas de índice W en tiempo cercano al real y convertir estos en verdaderos productos públicos.
- Existen otros tipos de perturbaciones como las Travelling Ionospheric Disturbances (TIDs). Estas perturbaciones son estructuras en la ionosfera que tienen escalas de 100 – 1000 km de longitud de onda horizontal) y se mueven a velocidades de entre 50 – 1000 m/s (Davies Kenneth [1990]). Si bien estas estructuras no forman parte del tema de investigación, deben ser cuantificadas en trabajos a futuro haciendo uso de datos GPSs combinados con técnicas observacionales que hacen uso de cámaras especiales observando estructuras a 630 nm.
- Finalmente, como parte crítica a este trabajo; es necesario recurrir, en el ámbito de los datos de GPSs, a los datos de otras redes como TlalocNet para el ciclo solar 23 y aumentar más la estadística de estudio. Sin embargo, debemos ser claros que los ciclos solares 23 y 24

fueron totalmente distintos en varios aspectos (número de eventos observados, número de regiones activas, intensidad de las tormentas geomagnéticas, etc.) que es posible que la comparación no sea del todo adecuada, aunque si puede dar condiciones de partida para dicha comparación.

BIBLIOGRAFIA

- Araujo-Pradere, E.A. et al., (2007). *Differential validation of the US-TEC model* Radio Science, 42(03), pp. 1-8.
- Bohm, J. and Schuh, H., (2013). *Atmospheric effects in space geodesy* (Vol. 5). Berlin: Springer.
- Bothmer, V., & Daglis, I. A. (2007). *Space weather: physics and effects*. Springer Science & Business Media.
- Buonsanto, M. J., (1999). *Ionospheric storms—A review* Space Science Reviews, 88(3-4), pp. 563-601
- Awange, J.L., (2018). *GNSS environmental sensing*. Springer International Publishers. DOI, 10, pp.978-3.
- Cipagauta-Lara E., (2007). *Dinámica de la ionosfera de latitudes bajas*. Tesis de maestría, UNAM.
- Cliver, E.W. and Dietrich, W.F., (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, p.A31.
- Davies Kenneth (1990). *Ionospheric Radio*, Electromagnetic Waves Series 31, IET. ISBN: 0-86341-186-X
- De la Luz, V., Gonzalez-Esparza, J.A., Sergeeva, M.A., Corona-Romero, P., González, L.X., Mejía-Ambriz, J., Valdés-Galicia, J.F., Aguilar-Rodriguez, E., Rodriguez-Martinez, M., Romero-Hernandez, E. and Andrade, E., (2018). First Joint Observations of the Space Weather Events over Mexico. arXiv preprint arXiv:1808.07425.
- Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. (1994). *Response of The Thermosphere and Ionosphere to Geomagnetic Storms*, *Journal Geophysical Research*, Vol. 99, pp 3893-3914.
- Fuller-Rowell, T., (2005). *USTEC: a new product from the Space Environment Center characterizing the ionospheric total electron content*. *GPS Solutions*, 9(3), pp.236-239.
- Fuller-Rowell, T., et al., (2006). *USTEC: A new data assimilation product from the Space Environment Center characterizing the ionospheric total electron content using realtime GPS data*. *Radio science*, 41(6).
- Ghasemi, A. et al., (2013). *Propagation engineering in radio links design*. Springer Science & Business Media.
- González D. W., Tsurutani T. B. and Clua De Gonzalez L. A. (1999). *Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms*. *Space Science Reviews*. Vol. 88, pp 529–562. DOI: 10.1023/A:1005260129098.
- GonzálezEsparza, J.A. and CuevasCardona, M.C., (2018). Observations of LowLatitude Red Aurora in Mexico during the 1859 Carrington geomagnetic storm. *Space Weather*, 16(6), pp.593-600.
- Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T. and Vasyliunas, V.M., (1994). What is a geomagnetic storm?. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4), pp.5771-5792.
- Gopalswamy N. (2009). *The Sun and Earth's space environment*. In *Space Science and Communication*, 2009. IconSpace 2009. International Conference on (pp. 5-10). IEEE.

- Gulyaeva, T. L., and I. Stanislawska (2008). *Derivation of a planetary ionospheric storm index*. *Annales geophysicae: atmospheres, hydrospheres and space sciences*. Vol. 26. No. 9. 2008.
- Gulyaeva T., et al. (2008). *Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index*. *Annales geophysicae: atmospheres, hydrospheres and space sciences* Vol. 26, No. 2, p. 315
- Gurtner W. and Lou E. (2007). *RINEX, The Receiver Independent Exchange Format-version 3.00*. Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Colorado, pp 22.
- Hargreaves, J.K., (1992). *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace—the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere*. Cambridge University Press.
- Ibarra Ortega H., (2016). *Variación del contenido de electrones en la ionosfera a latitudes medias durante actividad geomagnética con $Dst \geq 50$ nT desde 1999 a 2014*. Tesis de maestría, UNAM.
- Jeffrey, C. (2010). *An introduction to GNSS. GPS, Glonass, Galileo and other Global Navigation Satellite System* First Edition, Published by NovAtel, Calgary, Alberta, Canada.
- Joselyn, J.A., 1995. *Geomagnetic activity forecasting: The state of the art* *Reviews of Geophysics*, 33(3), pp. 383-401.
- Kalman, R. E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, *Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering*, pp. 35-45.
- Kamide Y., et al. (1998). *Two-step development of geomagnetic storms*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Vol. 103 p. 6917-6921.
- Kamide, Y., Baumjohann, W., Daglis, I.A., Gonzalez, W.D., Grande, M., Joselyn, J.A., McPherron, R.L., Phillips, J.L., Reeves, E.G.D., Rostoker, G. and Sharma, A.S., (1998). *Current understanding of magnetic storms: Stormsubstorm relationships*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A8), pp.17705-17728.
- Kelley M. C. (1989). *The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics* San Diego, Academic Press 484p.
- Khattatov, B. et al., (2005). *Development of Ionospheric Assimilation and Forecasting System*. Fusion Numerics Inc Boulder Co.
- Kivelson, M. G., y Russell, C. T. (1996). *Introduction to Space Physics*, 568 páginas.
- Kivelson, M.G. and Bagenal, F., (2014). *Planetary magnetospheres*. In *Encyclopedia of the Solar System* (pp. 137-157). Elsevier.
- Knipp D. J., et al., (2004). *Direct and indirect thermospheric heating sources for solar cycles 21–23* *Solar Physics*, 224(1-2), p.495.
- Komjathy, A., (1997). *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. Doctoral dissertation, University of New Brunswick
- Lagzi, I., Meszaros, R., Gelybo, G. and Leelosy, A., 2014. *Atmospheric Chemistry*.
- Langley, R.B., (1991). *The mathematics of GPS* *GPS world*, 2(7), pp.45-50.

- 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.
- Leitinger, R. and Rieger, M., (2005). The TID model for modulation of large scale electron density models. Annals of Geophysics.
- Lincoln, J.V., (1964). *The listing of sudden ionospheric disturbances* Planetary and Space Science, 12(5), pp.419-434.
- Liu L, Wan W, Ning B, et al. Climatology of the mean TEC derived from GPS global ionospheric maps. J Geophys Res, 2009, DOI:10.1029/2009JA014244
- López-Montes R., (2010). Cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera sobre diversas estaciones mexicanas de GPS y su relación con el clima espacial asociado a ráfagas intensas de rayos X. Tesis de maestría, UNAM.
- Martyn, D. F. (1959). *The normal F region of the ionosphere*. Proceedings of the IRE, 47(2), p. 147-155.
- Matsushita, S., (1959) A study of the morphology of the ionospheric storms, J. Geophys. Res., 64, 305-321.
- Mayaud P. (1980). *Derivation, Meaning and Use of Geomagnetic Indices* Geophysical Monograph Series, 22
- McGee, L.A. and Schmidt, S.F., (1985) *Discovery of the Kalman filter as a practical tool for aerospace and industry*.
- Mendillo M. (2006). *Storms in the Ionosphere: Patterns and Processes for Total Electron Content*. Reviews of Geophysics Vol. 44.4 doi:10.1029/2005RG000193.
- Mimno, H. R. (1937). *The physics of the ionosphere* Reviews of Modern Physics, 9(1), 1.
- Mitra A. P. (1951). *The D-layer of the ionosphere*. Journal of Geophysical Research, 1951, vol. 56, no 3, p. 373-402.
- Perez-Enriquez, R., Lopez-Montes, R., & Araujo-Pradere, E. 2010, 38th COSPAR Scientific Assembly, 38, 4
- Pi, X., Mendillo, M., Fox, M.W. and Anderson, D.N., (1993). Diurnal double maxima patterns in the F region ionosphere: Substorm-related aspects. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 98(A8), pp.13677-13691.
- Prolss, G. W. (1991) *Thermosphere-Ionosphere Coupling during Disturbed Conditions*. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, Vol. 43, pp 537-549.
- Prolss W. G. (2004) *Physics of the Earth's Space Environment*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-97123-5
- Rodríguez-Martínez, M., Pérez-Enríquez, H.R., Carrillo-Vargas, A., López-Montes, R., Araujo-Pradere, E.A., Casillas-Pérez, G.A. and Cruz-Abeyro, J.L., (2014). Ionospheric disturbances and their impact on IPS using MEXART observations. Solar Physics, 289(7), pp.2677-2695.
- Russell T. C., Robert L. M., and Rande K. B. (1974). *On the cause of Geomagnetic Storm*. Journal of Geophysical Research, Vol. 79, pp 1105-1109.

- Russell, C.T., 2000. The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial. *IEEE transactions on plasma science*, 28(6), pp.1818-1830.
- Subirana, J.S., Hernandez-Pajares, M. and Jose Miguel Juan Zornoza, 2013. *GNSS Data Processing: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency.
- Schaer, S. and Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique, (1999). *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System* (Vol. 59). Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich.
- Schunk R. and Nagy A. (2009). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-87706-0
- Sergeeva, M. A. et al., (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.A., et al., (2018) *TEC behavior over the Mexican region* *Annals of Geophysics*, 61(1), p.104.
- Sergeeva, M.A., Maltseva, O.A., Gonzalez-Esparza, J.A., De la Luz, V. and Corona-Romero, P., (2017), August. Estimates of ionosphere state over Mexico with TEC data. In 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS) (pp. 1-3). IEEE.
- Stanislawski, I., & Gulyaeva, T. (2015). *Ionospheric W index based on GNSS TEC in the operational use for navigation systems*. In *Satellite Positioning-Methods, Models and Applications*. InTech. 2015
- Stening, R. J. (1992). *Modelling the low latitude F region*. *Journal of atmospheric and terrestrial physics*, 54(11-12), p. 1387-1412.
- Subirana J. S., et al., (2013) *GNSS Data processing Volume 1: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communications ESTEC, PO Box, 299, p.2200.
- Sugiura, M., and S. Chapman (1960). *The Average Morphology of Geomagnetic Storms with Sudden Commencement*. *Abhandl. Akd. Wiss. Gottingen. Math. Phys. Kl. Sonder heft, 4*, 1960.
- Thome G. D. and L. S. Wagner (1971) *Electron Density Enhancements in the E and F Regions of the Ionosphere During Solar Flares*. *Journal Geophysical Research*, Vol. 76, pp. 6883-6895, DOI:10.1029/JA076i028p06883.
- Tsurutani, B. (1999). *Solar/interplanetary plasma phenomena causing geomagnetic activity at Earth*.
- Ugalde-Calvillo L., (2017). *Ionosfera terrestre mexicana usando estaciones GNSS y MEXART*. Tesis de maestría, UNAM.
- Velthoven, P.F.J (1990): *Medium scale irregularities in the ionospheric electron content*, Ph.D. Thesis (Technische Universiteit Eindhoven, NL-5600 MB Eindhoven).
- Watanabe, K., Masuda, S. & Segawa, T. *Sol Phys* (2012). *Hinode Flare Catalogue*. 279: 317. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-9983-y>
- Whitehead, J. D. (1961). *The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones*, *J. Atmos. Terr. Phy.*, 20, p. 49-58.

Zolesi, B. and Cander, L.R., (2014). Ionospheric prediction and forecasting. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Zou et. al., (2000). Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. I. Modelling. *Annales Geophysicae*. 18, 8, 927-944.