



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS

VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE ELECTRONES EN LA
IONOSFERA A LATITUDES MEDIAS DURANTE ACTIVIDAD
GEOMAGNÉTICA CON $D_{st} \geq 50$ nT DESDE 1999 A 2014

TESIS
QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA (Física Espacial)

PRESENTA:
Héctor Enrique Ibarra Ortega

TUTOR:
Dr. Héctor Román Pérez Enríquez
Centro de Geociencias

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
Dr. Juan Américo González Esparza, Instituto de Geofísica Morelia UNAM.
Dr. Armando Carrillo Vargas, Instituto de Geofísica Morelia UNAM.
Dr. Solai Jeyakumar, Departamento de Astronomía Universidad de Guanajuato.
Dr. José Eduardo Mendoza Torres, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Juriquilla, Santiago de Querétaro, enero de 2016.



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.

Héctor Enrique Ibarra Ortega: *Variación del contenido de electrones en la ionosfera a latitudes medias durante actividad geomagnética con $Dst \geq 50$ nT desde 1999 a 2014*, © Diciembre 2015

RESUMEN

El 14 de Junio de 2012 a las 1300 UT, una ráfaga solar clase M1.9 ocurrió en la region activa AR 1504, situada cerca del meridiano central, asociada a una eyección de masa coronal viajando hacia la Tierra a una velocidad de 987 km/s, generando un periodo de actividad geo/-magnética peculiar. El día 16 de junio a las 2020 UT, el índice Dst mostró un incremento peculiar de 95 nT seguido de una tormenta geomagnética con una caída de hasta -71 nT. Al día siguiente durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética, la ionosfera no presentó una disminución considerable en la concentración de electrones en comparación con los días previos.

El propósito de este trabajo es analizar el impacto en la ionosfera de este y otros eventos similares que han ocurrido desde 1999, en los cuales el índice Dst alcanzó valores iguales o superiores a 50 nT, asociados o no, con tormentas geomagnéticas de -50 nT o menores. Para esto, se utilizaron los datos de la actividad geomagnética y el viento solar, así como datos del contenido total de electrones en la ionosfera (TEC, por sus siglas en inglés) de varias estaciones mexicanas de GPS.

Se encontró que los eventos de 16 de marzo de 1999, 15 de Mayo de 2005 y 16 de junio de 2012 muestran un comportamiento similar en TEC, en el sentido de la disminución en la concentración de electrones. Este no es el caso para los eventos de 23 de mayo de 2002 y 13 de julio de 2000, ya que estos últimos ocurrieron el mismo periodo del año y presentaron un incremento en la amplitud de la variación diurna de TEC. Así, las condiciones del viento solar parecen influir en el carácter de la respuesta ionosférica.

ABSTRACT

On 14 June 2012, at 1300UT, a class M1.9 solar flare occurred in active region AR 1504, located close to central meridian, together with a coronal mass ejection traveling toward Earth at a speed of 987 km/s, contributing to the generation of a peculiar period of solar activity. In fact, the Dst geomagnetic index showed an increment to 95 nT and a fall to -71 nT. Meanwhile, the solar wind parameters like density, speed and interplanetary magnetic field showed the increase at mid-day followed by a peak toward the end of the day. The next day, during the recovery phase of the geomagnetic storm, the ionosphere presented decrease in electron concentration. The purpose of this work is to analyse the impact on the ionosphere of this and other similar events that have occurred since 1999, in which the Dst index reached values greater than 50 nT, and were associated or not with a geomagnetic storm of -50 nt or below. For this, solar wind and geomagnetic activity data, as well as ionospheric total electron content (TEC) data from several Mexican GPS stations were used. It was found that 16 May 1999, 15 May 2005, and 16 June 2012 events showed a similar behaviour in TEC, in the sense that there decrease in electron concentration. This is not the case for the events of 23 May 2002, and 13 July 2000, occurring during the same time of year, as they presented a an increase in the amplitude of the diurnal variation of TEC. Thus, the solar wind conditions appear to influence the character of the ionospheric response. Furthermore, when the conditions for electric field penetration into the magnetosphere seemed not particularly favorable, the geomagnetic field suffers a compression with an impact on the ionosphere diurnal variation.

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento a las siguientes personas:

A mi madre por su apoyo durante todo este tiempo.

A mi padre.

A mi asesor el Dr. Héctor Román Pérez Enríquez por sus enseñanzas y por tenerme paciencia.

Al Dr. Josué de Jesús Trejo Alonso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al proyecto PAPIIT IN102913.

A mis sinodales Dr. Juan Américo González Esparza, Dr. Armando Carrillo Vargas, Dr. Solai Jeyakumar y Dr. José Eduardo Mendoza Torres por sus consejos y correcciones para la versión final de esta tesis.

CONTENIDO

i ESTUDIO DEL CLIMA ESPACIAL	1
1 INTRODUCCIÓN	3
2 ANTECEDENTES	5
2.1 Actividad solar	5
2.1.1 Ráfagas solares	5
2.1.2 Eyección de masa coronal	6
2.2 Ciclo solar	7
2.3 Viento solar	7
2.4 Ionosfera Terrestre	8
2.4.1 Capas de la ionosfera	9
2.4.2 Retraso Ionosférico	11
3 HIPÓTESIS	15
ii METODOLOGÍA	17
4 ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA CON $Dst \geq 50$ nT	19
4.1 Datos del viento solar	21
4.2 Datos de GPS	21
4.3 Cálculo del TEC	22
iii RESULTADOS	25
5 RESULTADOS	27
5.1 Evento de Abril de 1999	27
5.2 Evento de Julio de 2000	29
5.3 Evento de Diciembre de 2001	31
5.4 Evento de Marzo de 2002	33
5.5 Evento de Mayo de 2002	35
5.6 Evento de Noviembre 2004	37
5.7 Evento de Diciembre 2004	39
5.8 Evento de Mayo de 2005	41
5.9 Evento de Febrero de 2011	43
5.10 Evento de Enero de 2012	45
5.11 Evento de Junio de 2012	47
5.12 Evento de Febrero de 2014	49
5.13 Resumen de los resultados obtenidos	51
iv DISCUSIÓN	53
6 DISCUSIÓN	55
v CONCLUSIONES	59
7 CONCLUSIONES	61

vi	APÉNDICE	63
A	VELOCIDAD DE FASE	65
B	VELOCIDAD DE GRUPO	67
C	ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN PLASMAS	69
	REFERENCIAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ráfaga clase X tomada por el NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO) el 9 de Agosto de 2011 en extremo ultravioleta a 131 Angstroms.	5
2	Eyección de masa captada por el satélite SOHO en febrero del 2000. El área oscura en el centro es el disco usado para bloquear la luz del Sol. El círculo blanco marca la superficie del Sol.	6
3	Ciclos solares 19 al 24 representados por el número de manchas en la fotosfera del Sol.	7
4	Perfil de densidades de electrones en la ionosfera. La curva sólida representa el perfil nocturno y la curva en trazos el perfil diurno.	10
5	Retraso de las señales de GPS con respecto al STEC.	13
6	Distribución de los eventos a lo largo de los ciclos solares 19 al 24.	20
7	Distribución de los eventos de 1999 a 2014 a lo largo de los ciclos solares 23 y 24.	20
8	Estaciones mexicanas GPS utilizadas para esta tesis.	21
9	Modelo de capa simple de la ionosfera.	23
10	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Abril de 1999, campo magnético total, sus componentes (Bx, By y Bz), temperatura y densidad de las partículas, índice Dst y el TEC.	28
11	TEC obtenido para el evento de Abril de 1999, la línea azul corresponde al comportamiento de la ionosfera en un día tranquilo.	28
12	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Julio de 2000.	30
13	TEC obtenido para el evento de Julio de 2000.	30
14	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Diciembre de 2001.	32
15	TEC obtenido para el evento de Diciembre de 2001.	32
16	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Marzo de 2002.	34
17	TEC obtenido para el evento de Marzo de 2002.	34
18	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Mayo de 2002.	36
19	TEC obtenido para el evento de Mayo de 2002.	36
20	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Noviembre 2004.	38
21	TEC obtenido para el evento de Noviembre 2004.	38

22	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Diciembre 2004.	40
23	TEC obtenido para el evento de Diciembre 2004. . .	40
24	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Mayo de 2005.	42
25	TEC obtenido para el evento de Mayo de 2005. . . .	42
26	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Febrero de 2011.	44
27	TEC obtenido para el evento de Febrero de 2011. . .	44
28	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Enero de 2012.	46
29	TEC obtenido para el evento de Enero de 2012. . . .	46
30	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Junio de 2012.	48
31	TEC obtenido para el evento de Junio de 2012.	48
32	Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Febrero de 2014.	50
33	TEC obtenido para el evento de Febrero de 2014. . .	50

ÍNDICE DE TABLAS

1	Eventos desde 1957 a 2014 con un incremento en el índice $Dst \geq 50$ nT y los valores mínimos durante la tormenta geomagnética que los precede. Donde "—" significa que la tormenta fue pequeña o moderada ($0 > Dst \geq 49$). 19
2	Diferencias y máximos valores en la velocidad y densidad del viento solar (ver catálogos Cane and Richardson (2003) ; Richardson and Cane (2010)) para los eventos 32-43 y la diferencia máxima en TEC durante la actividad geomagnética siguiente en comparación a lo esperado. 51

Parte I

ESTUDIO DEL CLIMA ESPACIAL

En la primer parte se muestra un breve repaso a los antecedentes teóricos del clima espacial. La actividad solar en función de los eventos eruptivos en la superficie solar, su influencia en el medio interplanetario a través del viento solar y su impacto en la ionosfera. Se propone la hipótesis bajo la cual eventos geomagnéticos con un valor en el índice $Dst \geq 50$ nT tienen un impacto en el comportamiento de la ionosfera.

INTRODUCCIÓN

El clima espacial se refiere a las condiciones en el Sol y el viento solar, en particular al espacio que rodea a la Tierra (magnetosfera, ionosfera y termosfera), que pueden afectar las actividades humanas debido a su influencia sobre los sistemas de tecnológicos como las partículas energéticas que pueden significar riesgos para la salud. El clima espacial esta controlado por la actividad solar. Los eventos solares (ráfagas y/o eyecciones de masa) crean tormentas de radiación, fluctuación de los campos magnéticos y flujos de partículas energéticas. Estos fenómenos viajan con el viento solar a través del sistema solar. Cuando la actividad solar llega a la Tierra, mediante el viento solar, interactúa con el campo magnético de la Tierra formando una cavidad llamada magnetosfera, dando origen a cinturones de partículas que orbitan la Tierra (cinturones de Van Allen, anillo de corriente), lluvias de partículas energéticas que excitan átomos en la atmósfera lo cual forma auroras en las regiones polares. Existe una conexión entre la magnetosfera y las capas superiores de la atmósfera, principalmente con la ionósfera (Sergeev et al., 2014; Khazanov and Glocer, 2014). Lo anterior hace posible estudiar los efectos de la actividad solar en la Tierra mediante las relaciones entre Sol-viento solar-magnetosfera-ionósfera. En la actualidad el estudio de la ionósfera terrestre tiene un especial interés debido a su impacto en las comunicaciones, por ejemplo, en la transmisión de señales de radio, incertidumbre en los sistemas de posicionamiento y errores en las comunicaciones por satélite e.g. Klobuchar (1997).

La ionosfera de la Tierra se genera principalmente por la ionización producida por la radiación ultravioleta solar al llegar a la parte superior de la atmósfera (Tsurutani et al., 2009). Las variaciones del contenido total de electrones (TEC, por sus siglas en inglés) de la ionósfera se asocian principalmente con las tormentas geomagnéticas que ocurren con la llegada de eyecciones de masa coronal (CME, por sus siglas en inglés) a la Tierra (Tsurutani et al., 2004). Por otra parte, durante las tormentas geomagnéticas, el campo eléctrico asociado al viento solar penetra en la magnetosfera, lo que causa variaciones ionosféricas. Durante tormentas geomagnéticas intensas, asociadas con la componente B_z sur del campo magnético interplanetario, Zhang et al. (2007) estudiaron las fuentes solares e interplanetarias de grandes tormentas geomagnéticas ($Dst \geq -100$ nT), haciendo hincapié en la importancia de un eficiente camino para firmas interplanetarias como eyecciones de masa coronal, o el viento solar rápido

que emana de los hoyos coronales, en particular las regiones de interacción corrotantes (CIR, por sus siglas en inglés) para penetrar la magnetosfera, es decir, la componente B_z sur del medio interplanetario (Gonzalez et al., 1994), que, de acuerdo con Crooker et al. (1992a); Huttunen et al. (2005a); Richardson et al. (2006), por ejemplo, podría ser incorporado en cualquier parte de la firma. Cuando esta penetración en la magnetosfera no es predominante, eventos peculiares como la tormenta que ocurrió el 16 de junio 2012 son posibles. Al mediodía del 16 de junio se observa la fase inicial de una tormenta geomagnética llamado comienzo súbito repentino (SSC, por sus siglas en inglés), pero, en lugar de pasar por el proceso esperado para una tormenta geomagnética, el índice Dst (provisional de Kyoto) subió a valores de 95 nT, para después disminuir en la fase principal de la tormenta a -71 nT.

Al examinar los registros del índice Dst desde 1957, ningún otro evento ha mostrado un aumento tan grande, ya sea que esté seguido de una tormenta geomagnética o no. Durante la fase principal de la tormenta, la ionosfera mostró una disminución en la concentración de electrones durante su variación diurna en comparación a los días previos y posteriores a la tormenta geomagnética. Esta actividad tiene su origen el 14 de Junio de 2012, ese día ocurrió en el Sol una ráfaga M9.1 detectada por el Solar Dynamic Observatory, de acuerdo al Soho-Lasco CME Catalogue, ocurrieron dos CME's, ambas consideradas como eventos pobres.

EL objetivo de este trabajo es analizar las componentes del viento solar y TEC sobre México para el evento de Junio de 2012 y otros similares, en los cuales el índice Dst alcanzó valores iguales ó superiores a 50 nT.

En las siguientes secciones se muestran los antecedentes teóricos acerca de la formación y composición de la ionosfera, la actividad geomagnética y los efectos de la ionosfera en la transmisión de señales electromagnéticas. En la sección de resultados se muestran los parámetros del viento solar y el cálculo del TEC a partir de datos de estaciones GPS permanentes dentro del territorio Mexicano. En la sección de discusión y conclusiones se presenta la interpretación de los resultados obtenidos.

ANTECEDENTES

2.1 ACTIVIDAD SOLAR

La actividad solar se refiere a fenómenos que ocurren dentro de la atmósfera exterior del Sol. Esta actividad se manifiesta en la forma de ráfagas solares (solar flares), eyecciones de masa coronal (CME), aceleración del viento solar, calentamiento en la corona solar, aparición de manchas solares y flujos de radiación y partículas energéticas.

2.1.1 Ráfagas solares

Las ráfagas solares son eventos explosivos en la atmósfera del Sol, las cuales producen radiación en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. Pueden ser identificadas por su emisión en luz visible, esto es por el aumento considerable en la línea $H\alpha$. Las ráfagas [Figura 1](#)¹ se clasifican como A, B, C, M o X dependiendo del flujo de rayos X (W/m^2) [Tandberg-Hanssen and Emslie \(1988\)](#).

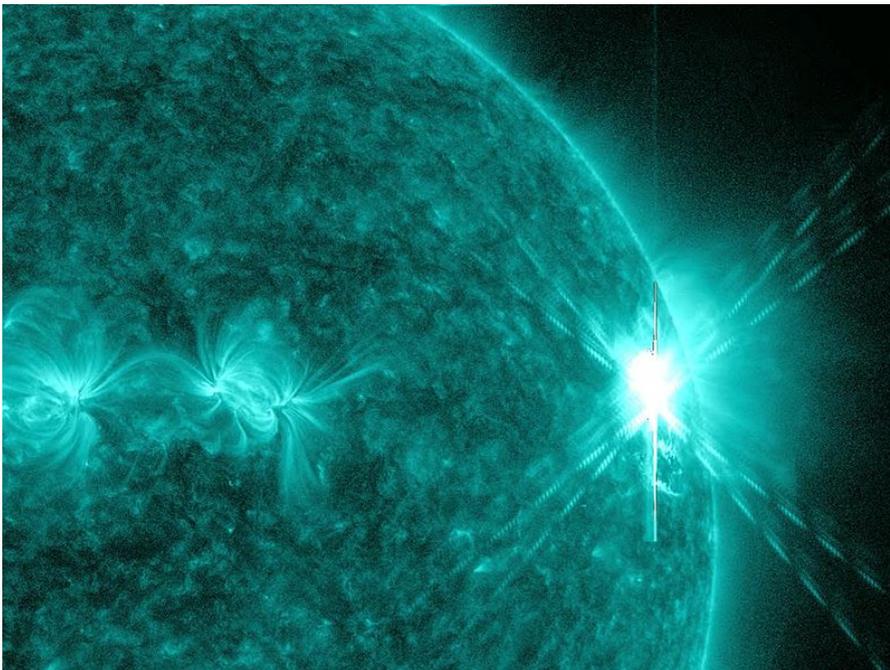


Figura 1: Ráfaga clase X tomada por el NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO) el 9 de Agosto de 2011 en extremo ultravioleta a 131 Angstroms.

¹ http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News080911-xclass.html

2.1.2 Eyección de masa coronal

Se denomina eyección de masa coronal a una erupción de plasma de gran escala. Las eyecciones de masa lanzan grandes cantidades de partículas y radiación electromagnética hacia el espacio más allá de la superficie solar, en algunos casos estas eyecciones se quedan en la corona llamándose entonces prominencias o pueden adentrarse a todo el sistema solar².

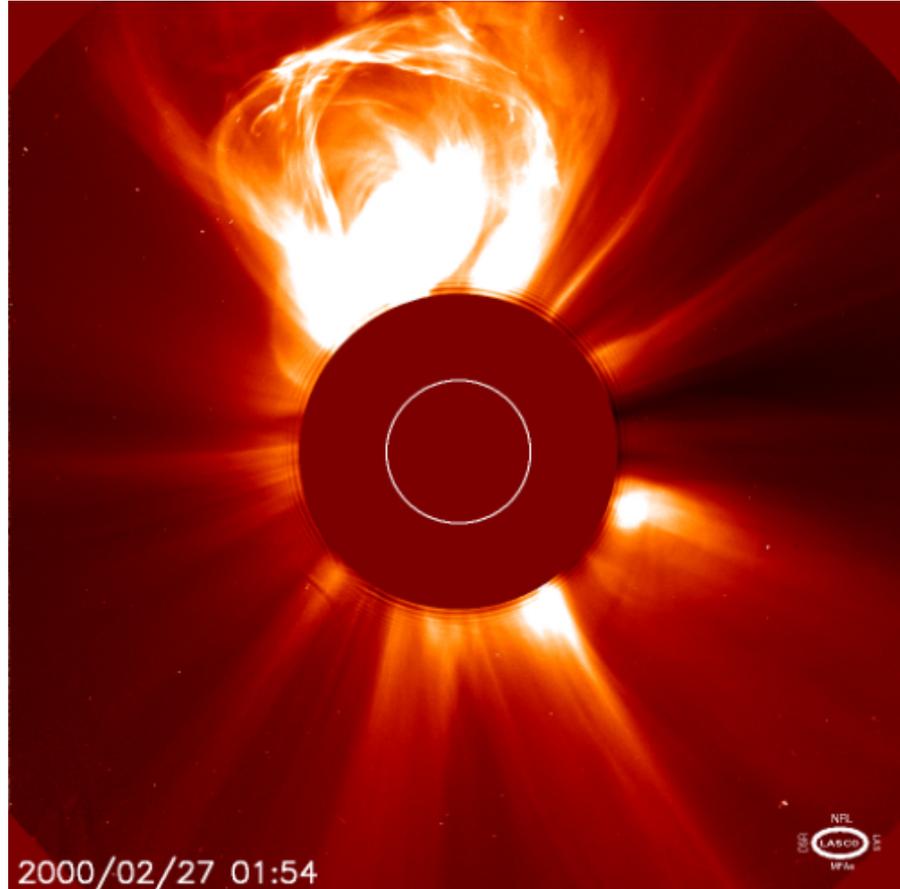


Figura 2: Eyección de masa captada por el satélite SOHO en febrero del 2000. El área oscura en el centro es el disco usado para bloquear la luz del Sol. El círculo blanco marca la superficie del Sol.

² http://en.es-static.us/upl/2012/11/febcm_e_sohoc2_big.jpg

2.2 CICLO SOLAR

La actividad solar cambia periódicamente en un ciclo con una duración media de 11 años. El ciclo se caracteriza por un cambio en la ocurrencia de eventos intensos (ráfagas, CME's). Las manchas solares son fenómenos temporales en la fotosfera del Sol que aparecen visiblemente como regiones oscuras en la superficie del Sol. Son causadas por una intensa actividad magnética. El número manchas solares es un buen indicador del ciclo de actividad solar (Karttunen, 2007), como se muestra en la Figura 3.

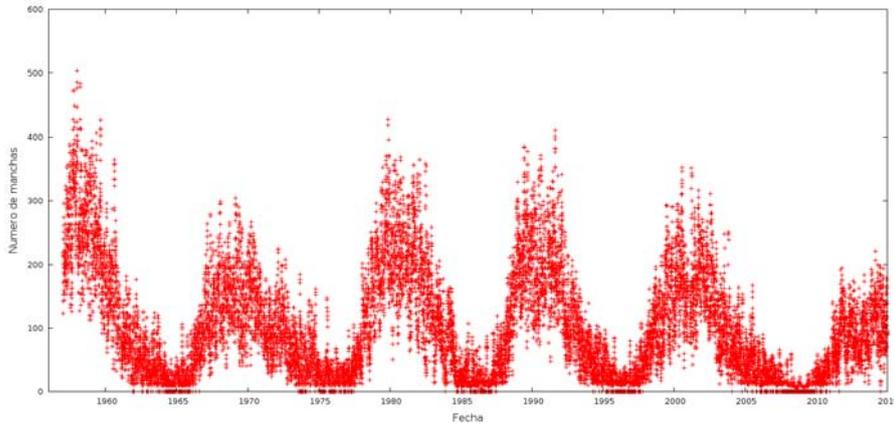


Figura 3: Ciclos solares 19 al 24 representados por el número de manchas en la fotosfera del Sol.

2.3 VIENTO SOLAR

EL viento solar es un flujo de radiación, partículas y campo magnético proveniente del Sol que ocupa el espacio interplanetario. Se produce debido al gradiente de presión y densidad entre la corona del Sol y el medio interestelar. La diferencia de presión conduce el plasma hacia el exterior a pesar de la gravedad del Sol (Parker, 1958). El flujo de partículas varía en densidad, temperatura y velocidad con el tiempo y es altamente influenciado por eventos como ráfagas y CME's, y transmite esta influencia a los planetas, cometas, polvo y rayos cósmicos que estén inmersos en el viento. Dependiendo de la velocidad a que se expande y a sus características físicas, el viento solar se divide en dos clases: viento solar rápido y viento solar lento. El viento solar rápido tiene una velocidad típica de 750 Km/s y una densidad de aproximadamente 3 p/cm^3 y una temperatura del orden de 10^5 K . El viento solar lento tiene una velocidad típica de 400 Km/s y una densidad de aproximadamente 10 p/cm^3 y una temperatura del orden de 10^4 K . Esta diferencia entre viento rápido y lento se debe a su origen, el viento solar rápido se origina en hoyos coronales en donde las líneas del campo magnético solar son abiertas, las cuales

se encuentran predominantemente en los polos. El viento solar lento se origina en las regiones ecuatoriales del Sol donde las líneas de campo magnético son cerradas (Feldman et al., 2005).

2.4 IONOSFERA TERRESTRE

La ionosfera es la región superior de la atmósfera caracterizada por la presencia de partículas cargadas (iones y electrones) como resultado de la ionización debida a radiación y colisión de partículas (fotoionización y ionización por impacto). La condición para que exista ionización es que la energía de los fotones ($h\nu$) y partículas (energía cinética) sea igual o superior al potencial de ionización de los átomos o moléculas en la atmósfera. La principal fuente de ionización es debida a fotones de origen solar con longitudes de onda en el ultravioleta (UV) y extremo ultravioleta (EUV). El modelo de ionización en la ionosfera se basa en la transferencia radiativa de los fotones a través de un gas neutro. Al atravesar un medio la radiación es absorbida y su intensidad decae como (Rybicki and Lightman, 2007):

$$-\frac{dI}{ds} = \sigma n_n I \quad (1)$$

donde n_n es la densidad de material neutro, σ es la sección eficaz de absorción e I es la intensidad de la radiación, la tasa de ionización es proporcional a la radiación absorbida:

$$Q = -C \frac{dI}{ds} = C \sigma n_n I \quad (2)$$

donde C es una constante de proporcionalidad (≈ 1 ion por 35 eV). En el caso de ionización debida a un flujo de partículas energéticas, su transporte y pérdida de energía en la atmósfera dependen de las colisiones que provocan una pérdida gradual de energía, a diferencia de los fotones que son absorbidos en un solo evento. Las partículas primarias producen electrones secundarios los cuales pueden tener la energía suficiente para producir su propia ionización. Partículas primarias y secundarias además pierden energía en forma de radiación Bremsstrahlung al sufrir deflexión debida a colisiones Coulombianas. La fórmula general para la producción de pares ion-electrón debido a partículas cargadas puede ser escrita como Dubach and Barker (1971):

$$Q(h) = \frac{1}{w} \int_E \int_{\Omega} \frac{dE}{dx} \cdot j(E) d(E) d(\Omega). \quad (3)$$

Para resolver este problema se utilizan alternativas como el método de Monte Carlo. La pérdida de iones o electrones debida a la recombinación depende de las concentraciones de iones y electrones y de un coeficiente de recombinación:

$$L = \alpha n_e n_i. \quad (4)$$

2.4.1 Capas de la ionosfera

Las capas de la ionosfera (Figura 4³) son producidas por la ionización de componentes específicos de la atmósfera los cuales responden a diferentes partes del espectro de radiación incidente o la energía de las partículas (para más detalle ver Kivelson and Russell (1995)).

Capa F: esta capa se subdivide en F1 y F2. La capa F1 representa la zona de máxima producción de iones y F2 es donde la densidad de electrones es máxima. La capa F1 está compuesta principalmente por iones O^+ y en menor cantidad NO_2 y O_2^+ . La densidad máxima en esta capa ocurre a 170 km. La producción de iones es debida a fotones con longitudes de onda entre 17 y 91 nm.

La capa F2 está compuesta por iones O^+ . Los iones O^+ reaccionan con partículas neutras para formar iones NO^+ y O_2^+ . Esta reacción supera a la recombinación por lo que la densidad de electrones aumenta. Esta capa se sitúa entre 200 y 450 km. Su grosor es máximo en periodos de alta actividad solar.

Capa E: los iones en esta capa son principalmente O_2^+ y NO^+ . Son producidos por radiación ultravioleta con longitudes de onda entre 90 y 130 nm y rayos x de origen solar con longitudes de onda entre 1 y 10 nm. Su máxima densidad ocurre aproximadamente a 100 km.

Capa D: esta capa tiene especial interés debido a su uso en telecomunicaciones. Sólo las fuentes de ionización más energéticas pueden penetrar hasta las altitudes donde se encuentra la capa D, entre 80 y 90 km, rayos x con longitudes de onda entre 0.1 y 1 nm. La emisión Lyman α (121.6 nm) es responsable de la ionización entre 70 y 80 km. Por debajo de los 70 km la ionización es principalmente a causa de rayos cósmicos. Los iones mas abundantes en esta capa son NO^+ y O_2^+ , estos pueden recombinarse con los electrones, pero a esas altitudes los electrones pueden unirse a moléculas neutras y formar iones negativos.

³ http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/126/htm/sec_7.htm

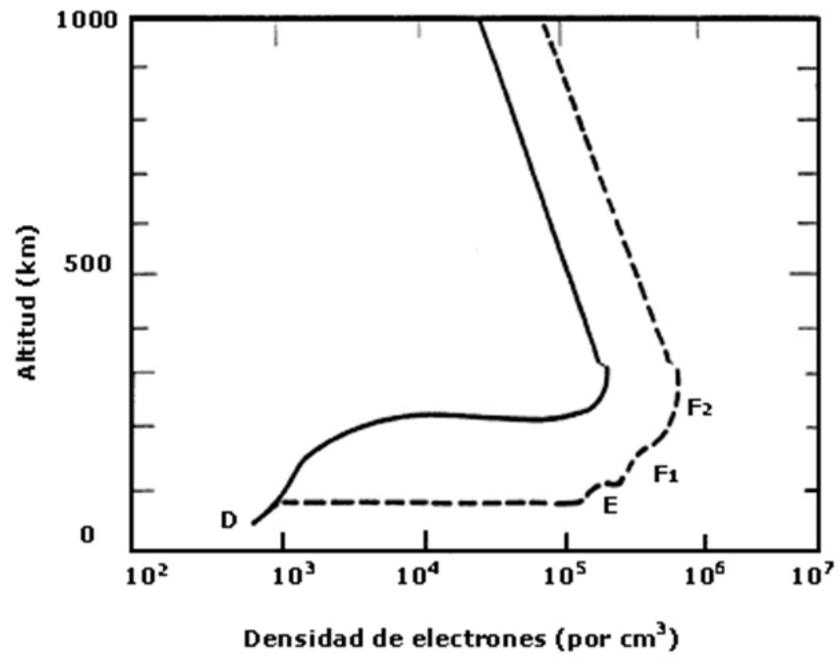


Figura 4: Perfil de densidades de electrones en la ionosfera. La curva sólida representa el perfil nocturno y la curva en trazos el perfil diurno.

2.4.2 Retraso Ionosférico

La relación de dispersión de una onda electromagnética en un plasma es [Apéndice C](#):

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_p^2 \quad (5)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y ω_p es la frecuencia del plasma ionosférico. Señales con $\omega < \omega_p$ serán reflejadas, mientras que señales con $\omega > \omega_p$ podrán atravesar el plasma. La frecuencia ω_p depende de la densidad de electrones:

$$\omega_p = 2\pi f_p \quad (6)$$

$$f_p = 8.98\sqrt{N_e} \quad (7)$$

La densidad de electrones máxima en la ionosfera es del orden de $N_e \simeq 10^6 \text{ e}^-/\text{m}^3$ [Figura 4](#), de acuerdo a la ecuación 7 las señales con una frecuencia $f > f_p \simeq 10^3 \text{ Hz}$ pueden atravesar la ionosfera. Las señales del sistema global de navegación por satélite operan en frecuencias del orden de 10^9 Hz . Sabiendo que $\omega = 2\pi f$ y $\omega_p = 2\pi f_p$ y usando las definiciones de velocidad de fase y velocidad de grupo ver [Apéndice A](#) y [Apéndice B](#):

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad (8)$$

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} \quad (9)$$

Podemos escribir la relación de dispersión 5 de la siguiente manera:

$$1 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} + \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{c^2}{v_{ph}^2} + \frac{f_p^2}{f^2}$$

Obtenemos la velocidad de fase para una señal de frecuencia f al atravesar la ionosfera:

$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}} \quad (10)$$

La velocidad de grupo se obtiene derivando 5 con respecto a k y con la definición 9:

$$2\omega \frac{d\omega}{dk} = 2c^2 k$$

$$\frac{\omega}{k} \frac{d\omega}{dk} = c^2$$

$$v_{ph} \frac{d\omega}{dk} = c^2$$

Sustituyendo 10:

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} = c \cdot \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \quad (11)$$

El índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la señal en el vacío y en el medio. Los índices de refracción para la velocidad de fase y la velocidad de grupo son:

$$n_{ph} = \frac{c}{v_{ph}} \quad (12)$$

$$n_{gr} = \frac{c}{v_{gr}} \quad (13)$$

Sustituyendo 10, 7 y usando la aproximación ⁴ obtenemos:

$$n_{ph} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \simeq 1 - \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f^2}$$

$$n_{ph} = 1 - \frac{40.3}{f^2} N_e \quad (14)$$

Haciendo el mismo procedimiento para el índice de refracción en la velocidad de grupo obtenemos:

$$n_{gr} = 1 + \frac{40.3}{f^2} N_e \quad (15)$$

El efecto de la refracción en la ionosfera se presenta como un retraso en la medición de la señal proveniente del satélite hacia el receptor. Esta diferencia está dada por (Figura 5):

$$\Delta = \int (n - 1) dl$$

Al sustituir los índices de refracción:

$$\Delta_{ph,f} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad (16)$$

$$\Delta_{gr,f} = +\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad (17)$$

La integral representa el total de electrones del medio por el que atravesó la señal. Se define como STEC (del inglés Slant TEC):

$$STEC = \int N_e dl \quad (18)$$

⁴ $\sqrt{1-x^2} \simeq 1 - \frac{1}{2}x^2$ es válida cuando $|x| \ll 1$. Las señales usadas por el sistema GPS son del orden de $f = 10^9$ y $f_p \simeq 10^7$

El STEC se define en unidades TEC, donde $1\text{TECu} = 10^{16}e^-/m^2$. El retraso ionosférico para una frecuencia f se representa como:

$$I_f = \alpha_f \text{STEC} \quad (19)$$

$$\alpha_f = \frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} \text{m/TECU} \quad (20)$$

En términos de las señales del GPS la velocidad de fase corresponde la señal portadora mientras que el código (información) viaja en la velocidad de grupo. La diferencia entre la emisión de la señal y su recepción:

$$\Delta t = t_r - t_e. \quad (21)$$

Idealmente al multiplicar este valor por la velocidad de la luz se obtendría la distancia entre el satélite y el receptor pero esta distancia no es un valor real ya que necesita ser corregida por su paso por la ionosfera y la troposfera. La medición de fase es un retraso entre la señal recibida y la señal generada por el receptor. Ambas señales son senoidales por lo que hay un número de ciclos N entre la señal generada y la recibida:

$$\phi = f(t_r - t_e) + N \quad (22)$$

Al multiplicar por la longitud de onda obtenemos la diferencia de fase en metros:

$$\Phi = c(t_r - t_e) + \lambda N \quad (23)$$

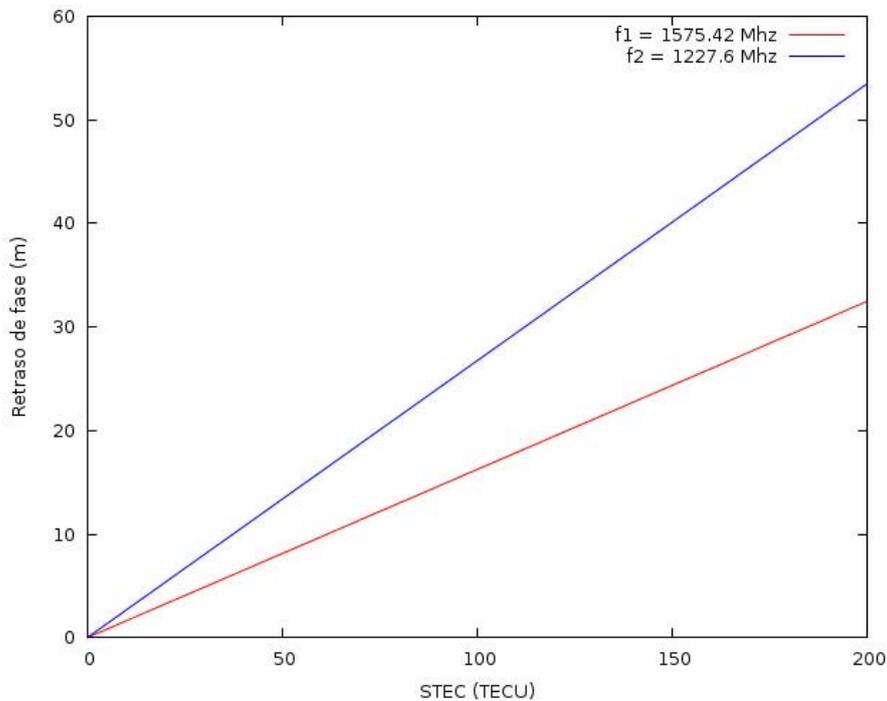


Figura 5: Retraso de las señales de GPS con respecto al STEC.

HIPÓTESIS

Los eventos con actividad geomagnética en los que el índice Dst es igual o superior a 50 nT son muy escasos, encontrándose únicamente 43 eventos desde 1957 hasta 2014. Estos eventos presentan condiciones poco favorables para la penetración del viento solar en la magnetosfera terrestre, lo cual produce una compresión seguida de moderadas tormentas geomagnéticas o la ausencia de estas. A pesar de la poca actividad geomagnética la ionosfera presenta variación en su concentración de electrones como consecuencia de estos eventos.

Parte II

METODOLOGÍA

En esta parte se presentan los eventos de interés en los cuales el índice Dst alcanzó valores iguales o superiores a 50 nT. Las bases de datos de donde se obtuvo la información del viento solar y datos de GPS para cada evento a analizar, así como el mecanismo mediante el cual se puede estimar el TEC a partir de señales GPS.

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA CON $Dst \geq 50$ nT

El índice Dst da información de la intensidad del anillo de corriente alrededor de la Tierra formado por protones y electrones de origen solar. Desde que el índice Dst ha sido compilado por el observatorio geomagnético de Kyoto ¹, se tienen registrados solo 43 eventos en los cuales el Dst ha alcanzado valores mayores o iguales a 50 nT, la mayoría de los cuales están asociados a pequeñas y moderadas tormentas geomagnéticas ($Dst \leq -100$ nT). El mayor incremento fue el 16 de Junio de 2012 donde el índice Dst alcanzó un valor de 95 nT seguido de una tormenta geomagnética con una caída en la fase principal de -71 nT. La [Tabla 1](#) muestra los eventos con un $Dst \geq 50$ nT desde 1957 a Febrero de 2014, seguidos o no por una tormenta geomagnética, se tomó como tormenta a la caída en el índice $Dst \leq -50$ nT.

Tabla 1: Eventos desde 1957 a 2014 con un incremento en el índice $Dst \geq 50$ nT y los valores mínimos durante la tormenta geomagnética que los precede. Donde "—" significa que la tormenta fue pequeña o moderada ($0 > Dst \geq 49$).

Evento	Fecha	Dst Max.	Dst Min.	Evento	Fecha	Dst Max.	Dst Min.
1	1957/07/27	55	—	23	1982/10/28	59	-69
2	1958/07/08	56	-330	24	1984/06/15	50	—
3	1959/01/25	55	-52	25	1990/07/28	66	-129
4	1959/05/12	64	-88	26	1991/03/24	63	-298
5	1960/08/29	50	-111*	27	1992/05/07	50	-64
6	1961/07/13	92	-132*	28	1992/08/04	51	-77
7	1961/09/30	60	-171	29	1992/09/02	50	-77
8	1962/02/04	57	-62	30	1993/05/27	50	—
9	1962/02/26	60	—	31	1997/01/11	50	—
10	1962/05/05	51	-66	32	1999/04/16	65	-91
11	1962/07/26	57	-59	33	2000/07/13	50	—
12	1963/04/30	62	—	34	2001/12/29	55	-58
13	1963/06/06	60	-78	35	2002/03/18	59	—
14	1964/08/04	59	—	36	2002/05/23	63	-109
15	1967/05/25	55	-387	37	2004/11/07	61	-374
16	1968/05/07	55	-77*	38	2004/12/05	67	—
17	1978/12/14	52	-68*	39	2005/05/15	52	-247
18	1979/06/06	52	—	40	2011/02/18	51	—
19	1979/07/03	69	—	41	2012/01/22	59	-69
20	1981/08/10	50	—	42	2012/06/16	95	-71
21	1982/05/26	70	-59	43	2014/02/15	52	—
22	1982/06/06	51	—				

¹ <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>

En la [Figura 6](#) se muestra la distribución de los eventos a lo largo del ciclo solar representado por el número de manchas en la superficie del Sol.

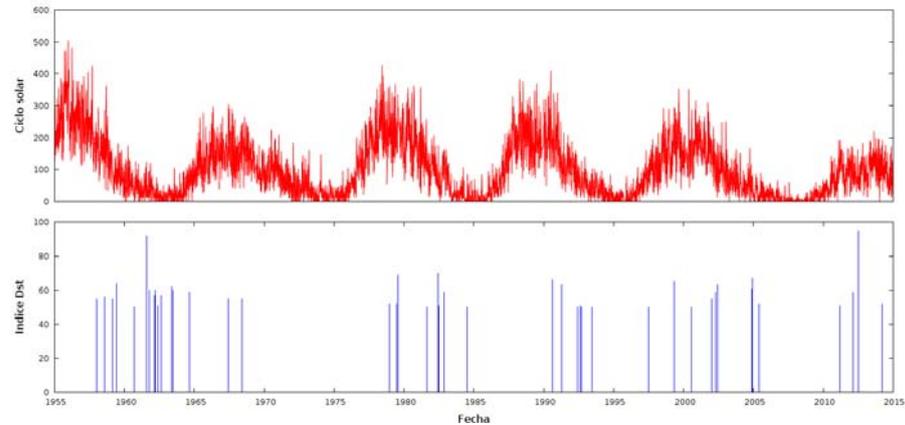


Figura 6: Distribución de los eventos a lo largo de los ciclos solares 19 al 24.

Para analizar el comportamiento en la ionosfera, sólo los eventos desde 1999 a 2014 fueron considerados (eventos marcados en amarillo ver [Tabla 1](#)). Esto debido a que los datos de GPS antes de 1999 son muy escasos haciendo el cálculo de TEC poco fiable. Por lo que el análisis se reduce a los eventos correspondientes a los ciclos solares 23 y 24 ([Figura 7](#)).

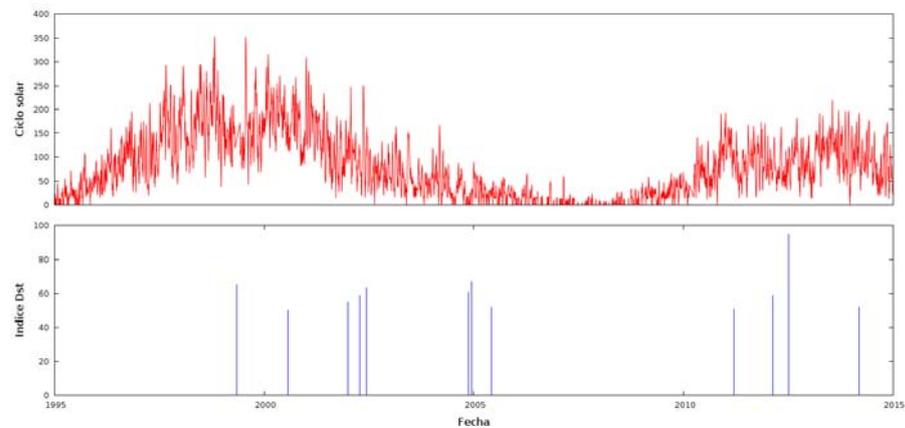


Figura 7: Distribución de los eventos de 1999 a 2014 a lo largo de los ciclos solares 23 y 24.

4.1 DATOS DEL VIENTO SOLAR

Las componentes del campo magnético interplanetario y los datos del viento solar fueron obtenidos del NASA's Space Physics Data Facility (SPDF) OMNI data set², en donde se tiene acceso a los datos del viento solar obtenidos por los satélites ACE, Wind, IMP 8, Geotail y GOES. Se consultaron los datos del campo magnético interplanetario, la velocidad y densidad del viento solar, así como los índice Kp para las fechas de los eventos a analizar. El campo magnético interplanetario da información sobre las condiciones necesarias para que ocurra una tormenta geomagnética, los datos de velocidad y densidad dan información sobre la posible presencia de un choque en la magnetósfera, el índice Kp se utilizó para diferenciar los periodos de poca o mayor perturbación en la magnetósfera.

4.2 DATOS DE GPS

El TEC es calculado a partir de la diferencia de fase de dos señales de diferente frecuencia usadas por el sistema GPS. Para este trabajo se utilizaron datos de varias estaciones permanentes de GPS en territorio mexicano [Figura 8](#). Estos datos se obtuvieron en los portales de CORS³, UNAVCO⁴ y SOPAC⁵. Para facilitar la obtención de datos se implementó un programa escrito en C++ el cual aprovecha el "Protocolo de Transferencia de Archivos" (FTP por siglas en inglés) para buscar y descargar datos de cualquier estación disponible en los sitios antes mencionados.

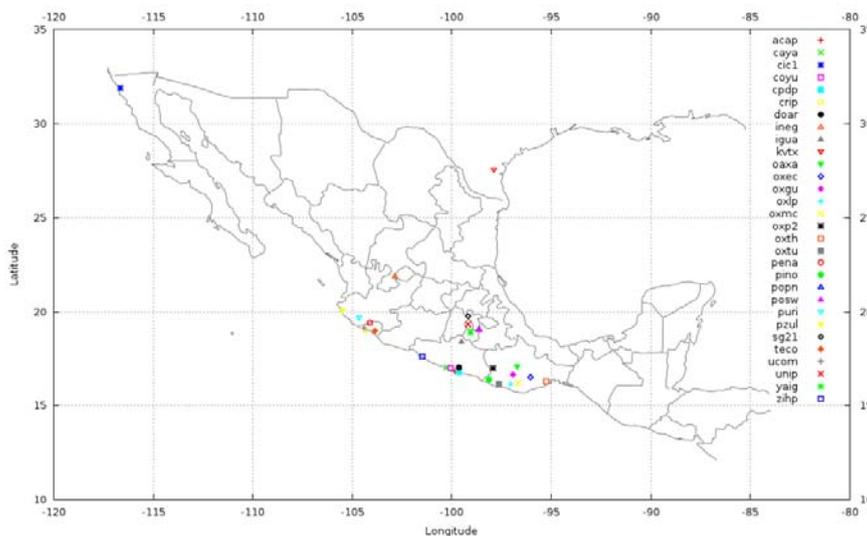


Figura 8: Estaciones mexicanas GPS utilizadas para esta tesis.

2 http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow_min.html

3 <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/standard1.shtml>

4 <http://www.unavco.org/>

5 <http://sopac.ucsd.edu/>

4.3 CÁLCULO DEL TEC

El sistema GPS opera con 2 frecuencias (f_1 y f_2) derivadas a partir de una frecuencia fundamental $f_0 = 10.23\text{MHz}$

$$f_1 = 154 * f_0 = 1575.42\text{MHz}$$

$$f_2 = 120 * f_0 = 1227.60\text{MHz}$$

Idealmente se podría multiplicar la velocidad de la luz c por la diferencia de tiempo en que la señal es emitida y es recibida. Esto nos daría la distancia (rango) entre el satélite y el receptor en tierra.

$$\rho = c(t_{r,ec} - t_{e,mt}) \quad (24)$$

Debido a que los relojes del satélite y del receptor no están perfectamente sincronizados, existe una diferencia adicional entre el tiempo de emisión y recepción:

$$t_{r,\bar{e}c} = t_{r,ec} + \Delta t_{r,ec} - \Delta t_{e,mt} = t_{e,mt} + \Delta t_{e,mt} \quad (25)$$

El valor observable es de hecho el "seudorango" o sea la distancia geométrica real más el error debido a la diferencia de los relojes:

$$P = c(t_{r,\bar{e}c} - t_{e,mt}) + c(\Delta t_{r,ec} - \Delta t_{e,mt}) = \rho + c(\Delta t_{r,ec} - \Delta t_{e,mt}) \quad (26)$$

Además la ecuación para el pseudorango debe ser corregida para incluir los efectos de la ionosfera, efemérides (errores orbitales), troposfera, efectos de reflejo (multipath), ruido del hardware para las frecuencias f_1 y f_2 respectivamente (Abidin, 1992):

$$P_{1,2} = \rho + c(\Delta t_{r,ec} - \Delta t_{e,mt}) + \Delta \text{ion}_{1,2} + \Delta \text{trop} + M_{1,2} + \delta_{1,2} \quad (27)$$

Donde el efecto de la ionosfera está relacionado con las ecuaciones 16 y 17, diferentes combinaciones lineales entre las fases y los pseudorangos son usados para eliminar los errores en los relojes y el efecto de la ionosfera (lo que es deseado para el sistema GPS) Beutler et al. (1990). La combinación P4 (Geometry-Free) Gende et al. (1998) elimina los efectos independientes de la frecuencia de la señal i.e. troposfera, efemérides y la información geométrica, preservando únicamente el efecto de la ionosfera, la diferencia entre los relojes y la combinación del ruido debido al reflejo (multipath) en P1 y P2.

$$P_4 = P_1 - P_2 = \Delta \text{ion} \quad (28)$$

Como ambas señales (f_1 y f_2) atraviesan la misma trayectoria en su paso por la ionosfera podemos tomar la combinación P_4 y la ecuación 17 y escribir:

$$P_1 - P_2 = 40.3 \text{TEC} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \quad (29)$$

Para obtener el STEC a partir de los pseudorngos (P_1 y P_2) y de las fases (L_1 y L_2) tenemos (Tariku, 2015) :

$$\text{TEC} = \frac{1}{40.3} \frac{(f_1 f_2)^2}{(f_1 - f_2)} (P_2 - P_1) \text{ pseudorngos} \quad (30)$$

$$\text{TEC} = \frac{1}{40.3} \frac{(f_1 f_2)^2}{(f_1 - f_2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \text{ fases} \quad (31)$$

El valor de TEC obtenido corresponde al STEC, TEC inclinado (Slant TEC, por sus siglas en inglés), para convertir este valor a VTEC (TEC vertical) es necesario utilizar un modelo en el que la ionosfera es representada como una capa delgada en la cual se concentra el efecto de la refracción ionosférica.

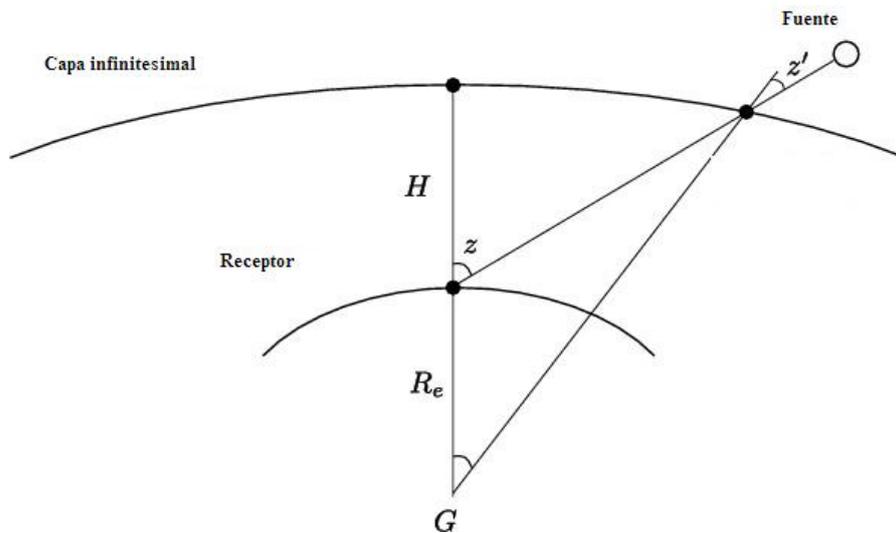


Figura 9: Modelo de capa simple de la ionosfera.

Asumiendo un modelo en el cual la máxima densidad de electrones se encuentra en una capa delgada entre 350-450 Km de altura sobre la superficie de la Tierra (Figura 9⁶), la relación entre VTEC y STEC es:

$$f(z) = \frac{\text{VTEC}}{\text{STEC}} = \cos(z') \quad (32)$$

6 <http://inspirehep.net/record/1236583/plots?ln=en>

$$VTEC = STEC \cos(z') \quad (33)$$

$$\sin(z') = \frac{R_e}{R_e + H} \sin(z) \quad (34)$$

Para obtener los datos de TEC se utilizó el programa "tequis" proporcionado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el cual se basa en las ecuaciones descritas en esta sección.

Una vez obtenido el VTEC para los días de interés se procedió a identificar perturbaciones en la variación diurna de la ionosfera. Se consideraron como días "tranquilos", sin perturbaciones, a los días anteriores al incremento del Dst en los cuales en índice k_p fuera igual o menor a 2. Para obtener un modelo más cuantitativo en la comparación entre un día quieto y un día perturbado se hizo uso de la periodicidad de la ionosfera (variación diurna) para ajustar una función de la forma:

$$a_1 \sin(b_1 x + c_1) + a_2 \sin(b_2 x + c_2) + \dots + a_n \sin(b_n x + c_n)$$

Esta función se ajusta al día tranquilo elegido y se construye un modelo de TEC esperado para los demás días analizados. Al tomar el día tranquilo más cercano al incremento en el Dst se está incluyendo a las perturbaciones estacionales propias de la ionosfera y se pueden identificar sólo las perturbaciones asociadas a los eventos. Se procedió a graficar los valores de TEC obtenidos junto al modelo de "día tranquilo" y la fase de la tormenta geomagnética en la se encuentran las perturbaciones (principal o recuperación). Tomando al período entre el aumento positivo hasta el mínimo valor alcanzado por el índice Dst como la fase principal de la tormenta geomagnética, se graficó una franja anaranjada en las gráficas de TEC para ilustrar en que fase de la tormenta se encuentra la perturbación ionosférica, la franja verde corresponde entonces a la fase de recuperación de la tormenta.

Parte III

RESULTADOS

En esta parte se presentan los resultados obtenidos al analizar las componentes del viento solar y el TEC calculado para los eventos de interés.

RESULTADOS

De los 43 eventos listados en la [Tabla 1](#), 16 no están relacionados con tormentas geomagnéticas con un valor Dst menor o igual a -50 nT. Solamente el evento de Julio de 1961 muestra un incremento en el índice Dst cercano al evento de referencia de Junio de 2012. Se graficaron las componentes del viento solar (campo magnético, densidad y velocidad) para identificar firmas que indiquen la presencia de choques en la magnetósfera. Se incluye el índice Dst para observar su evolución en el tiempo, su aumento hasta 50 nT o más, y la presencia de la posible tormenta geomagnética que lo precede. El comportamiento de la ionosfera en TECu es incluido y además es graficado aparte para diferenciar y cuantificar su amplitud. Se incluye el modelo de la ionosfera con el cual se compararon todos los eventos. Se colocaron barras de colores para identificar la parte de la actividad geomagnética en que se encuentra la perturbación.

5.1 EVENTO DE ABRIL DE 1999

Para el evento de Abril de 1999 en la [Figura 10](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 65 nT a las 15:00 horas UT del día 16. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 54 cm^{-3} y 410 km/s respectivamente. El campo magnético total aumenta hasta alcanzar un pico de 24.7 nT a las 9:37 horas UT del día 17, la componente Bz alcanza un valor pico negativo de -15.6 nT a las 4.32 horas UT del día 17. El día 17 ocurre una tormenta geomagnética de -91 nT a las 6.96 horas UT. En la [Figura 11](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 16 se observa una disminución en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -38 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

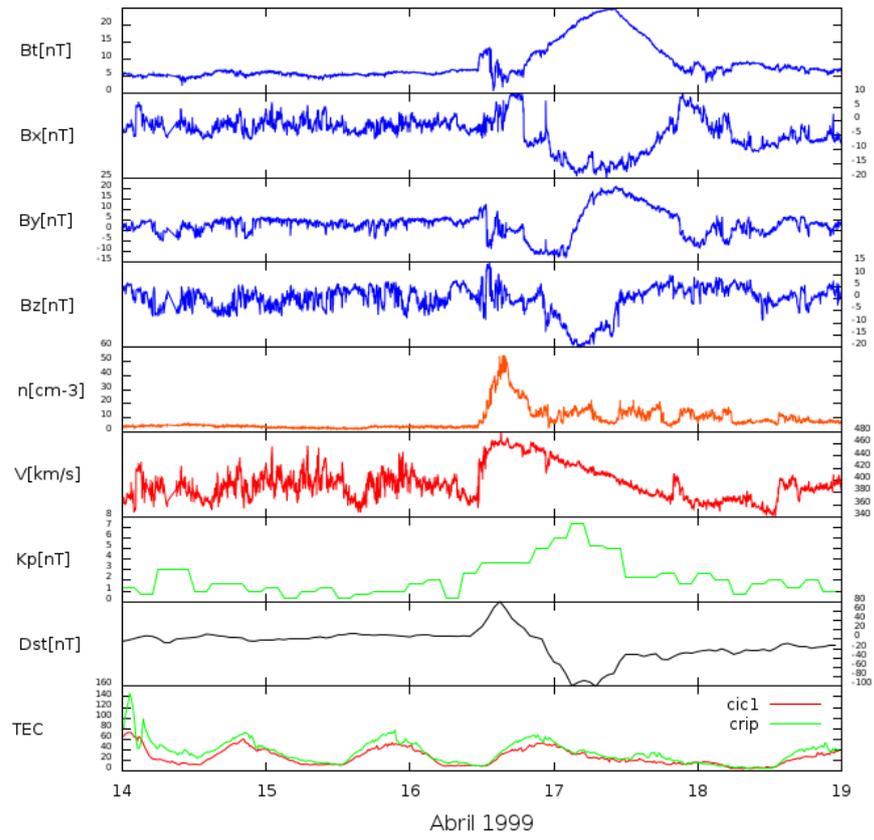


Figura 10: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Abril de 1999, campo magnético total, sus componentes (Bx, By y Bz), temperatura y densidad de las partículas, índice Dst y el TEC.

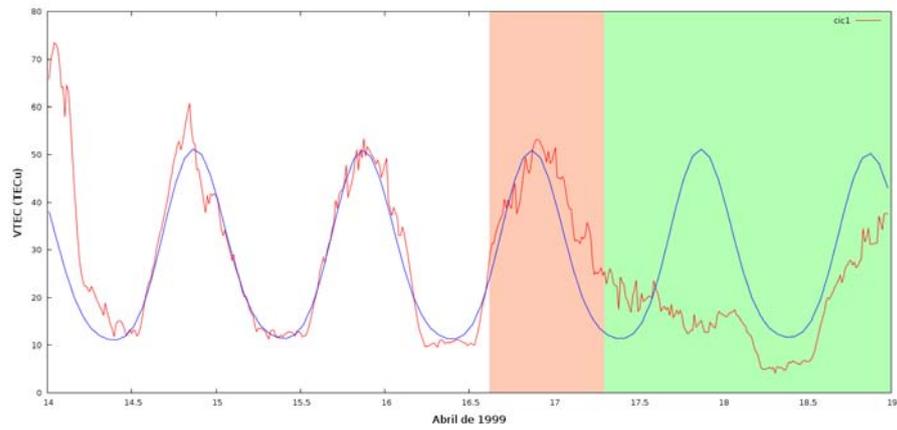


Figura 11: TEC obtenido para el evento de Abril de 1999, la línea azul corresponde al comportamiento de la ionosfera en un día tranquilo.

5.2 EVENTO DE JULIO DE 2000

Para el evento de Julio de 2000 en la [Figura 12](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 50 nT a las 10 horas UT del día 13. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 35 cm^{-3} y 670 km/s respectivamente. La componente Bz alcanza un valor pico negativo de -17 nT a las 10.56 horas UT del día 13. El día 13 ocurre una tormenta geomagnética de -44 nT a las 20.88 horas UT. En la [Figura 13](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. Los días 13, 14 y 15 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de 32 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética. Al final del día 15 se observa un aumento de 83 TECu en comparación al modelo, esto ocurre durante una nueva tormenta geomagnética de -189 nT (barra roja).

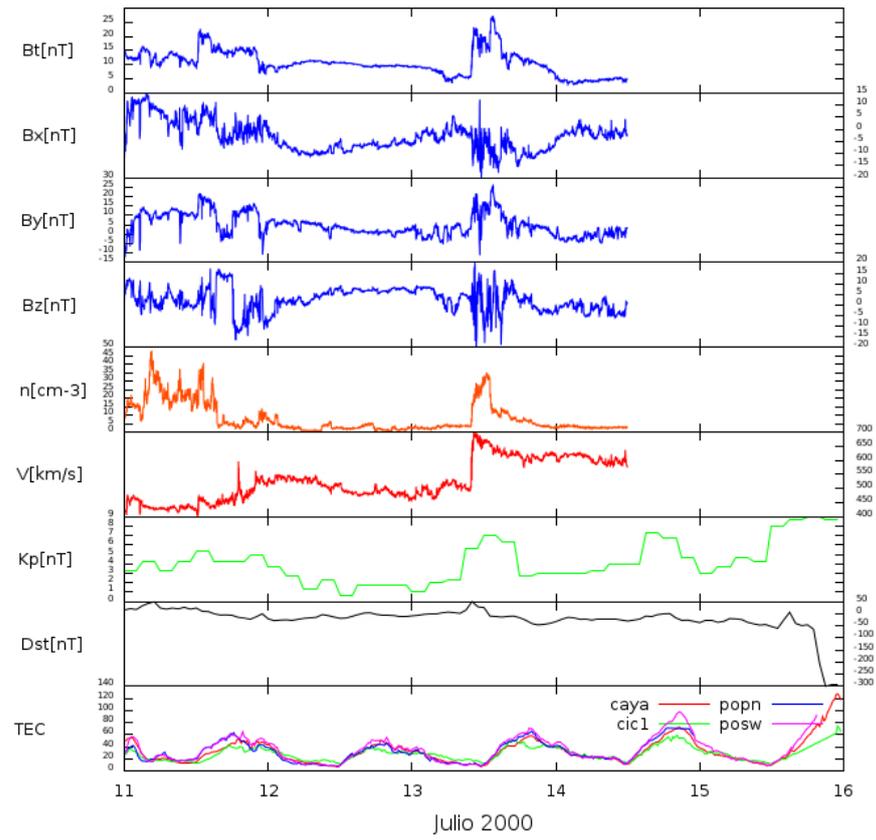


Figura 12: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Julio de 2000.

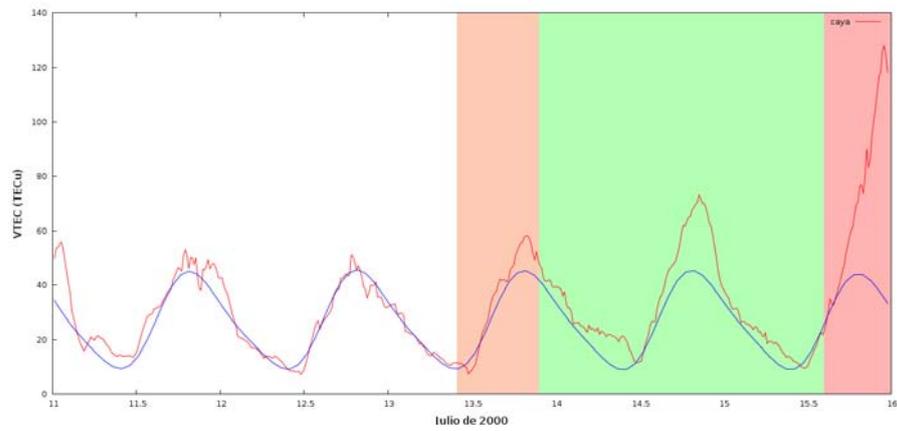


Figura 13: TEC obtenido para el evento de Julio de 2000.

5.3 EVENTO DE DICIEMBRE DE 2001

Para el evento de Diciembre de 2001 en la [Figura 14](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 55 nT a las 6 horas UT del día 29. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 58 cm^{-3} y 460 km/s respectivamente. El campo magnético total y sus componentes muestran un comportamiento perturbado lo cual se extiende hasta principios del día 30. El día 30 ocurre una tormenta geomagnética de -58 nT a las 5 horas UT. En la [Figura 15](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 29 a las 21 horas UT se observa una disminución en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -20 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética. Además de un incremento de 16 TECu en comparación al modelo a las 12 horas UT del día 31.

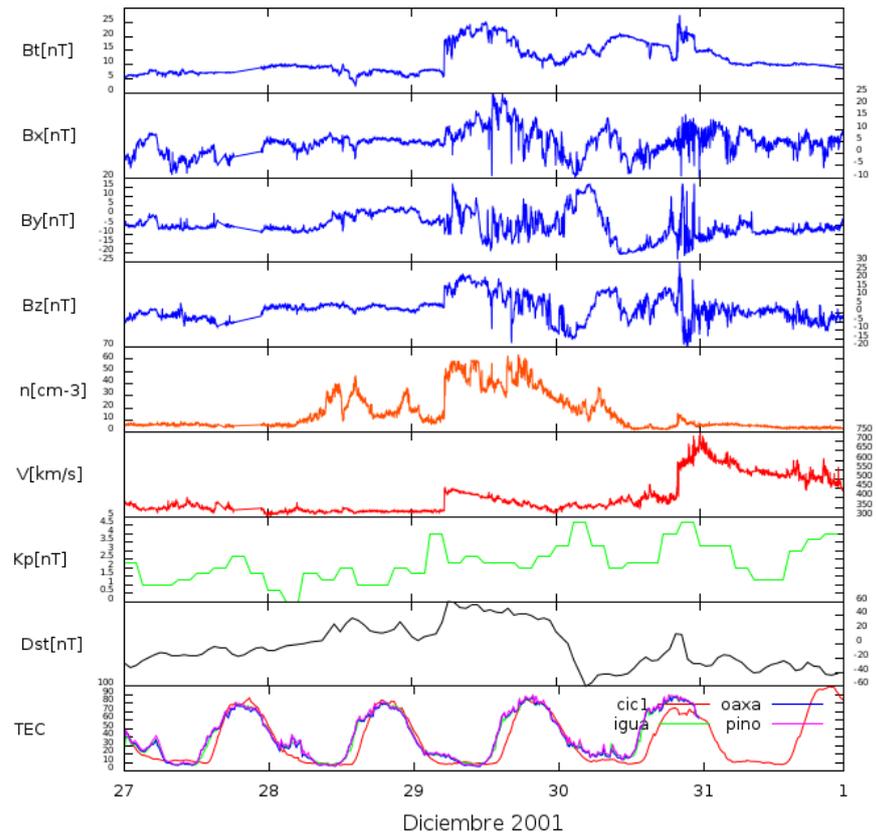


Figura 14: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Diciembre de 2001.

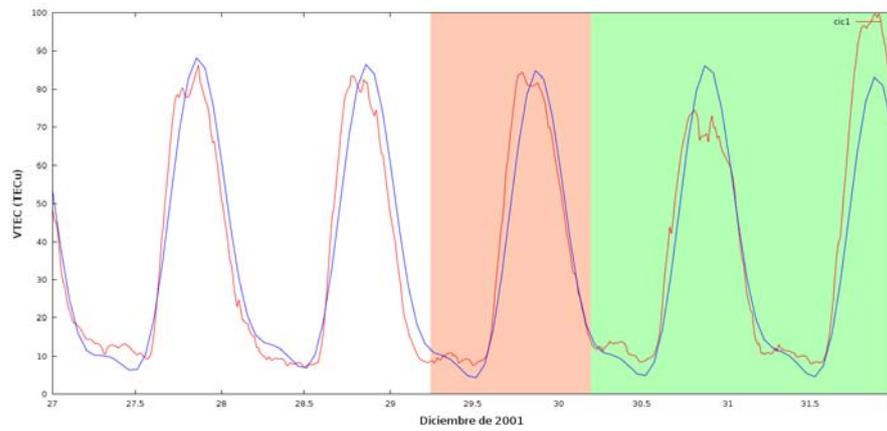


Figura 15: TEC obtenido para el evento de Diciembre de 2001.

5.4 EVENTO DE MARZO DE 2002

Para el evento de Marzo de 2002 en la [Figura 16](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 58 nT a las 15.36 horas UT del día 18. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 58 cm^{-3} y 460 km/s respectivamente. El campo magnético total y sus componentes muestran un comportamiento perturbado lo cual se extiende hasta principios del día 19. El día 19 ocurre una tormenta geomagnética de -36 nT a las 6 horas UT. En la [Figura 17](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 19 se observa una disminución en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -13 TECu durante la fase principal de la tormenta geomagnética.

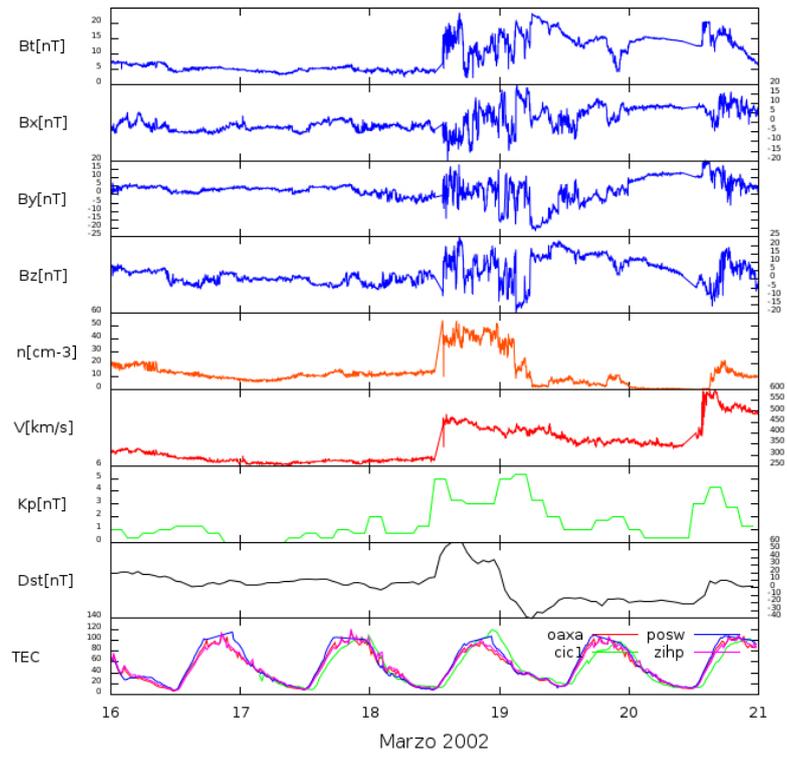


Figura 16: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Marzo de 2002.

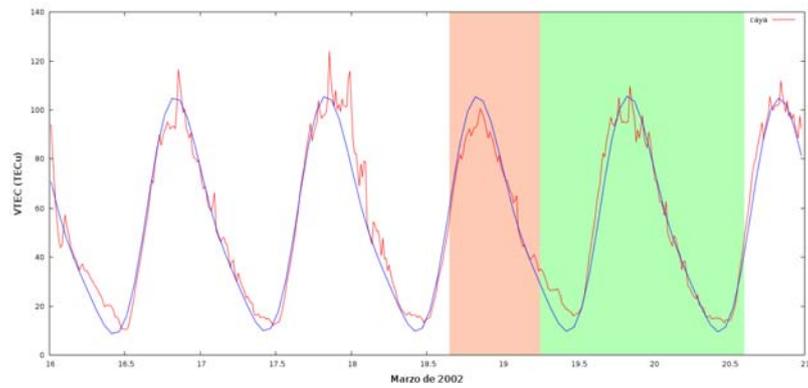


Figura 17: TEC obtenido para el evento de Marzo de 2002.

5.5 EVENTO DE MAYO DE 2002

Para el evento de Mayo de 2002 en la [Figura 18](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 63 nT a las 10.8 horas UT del día 23. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 27 cm^{-3} y 920 km/s respectivamente. El campo magnético total aumenta hasta alcanzar un pico de 58 nT también a las 10.8 horas UT del día 23, la componente Bz alcanza un valor pico negativo de -40 nT a las 12 horas UT del día 23. El día 23 ocurre una tormenta geomagnética de -109 nT a las 16.8 horas UT. En la [Figura 19](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 23 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de 20 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

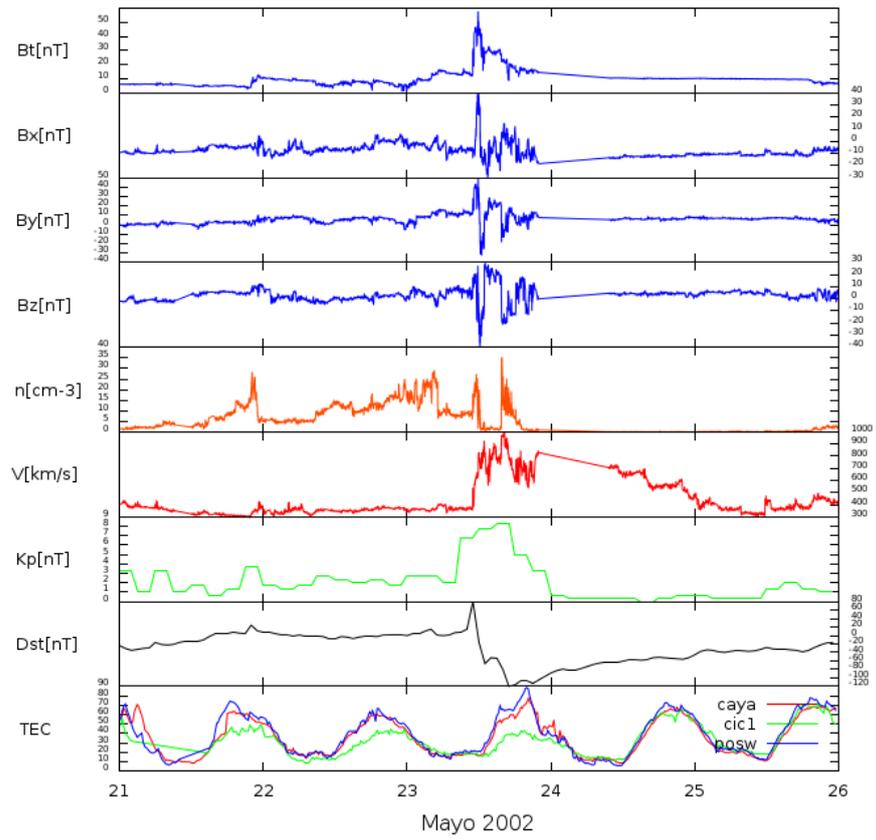


Figura 18: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Mayo de 2002.

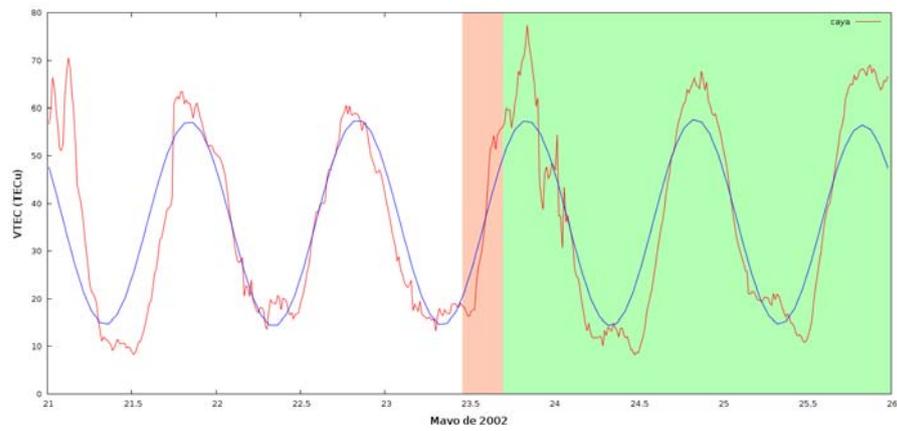


Figura 19: TEC obtenido para el evento de Mayo de 2002.

5.6 EVENTO DE NOVIEMBRE 2004

Para el evento de Noviembre 2004 en la [Figura 20](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 54 nT a las 11.7 horas UT y un segundo incremento de 60 nT a las 18.96 horas UT del día 7. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 62 cm^{-3} y 720 km/s respectivamente. El día 8 ocurre una tormenta geomagnética de -374 nT a las 6 horas UT. En la [Figura 21](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. Durante los días 7, 8 y 9 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de 42 TECu durante las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética.

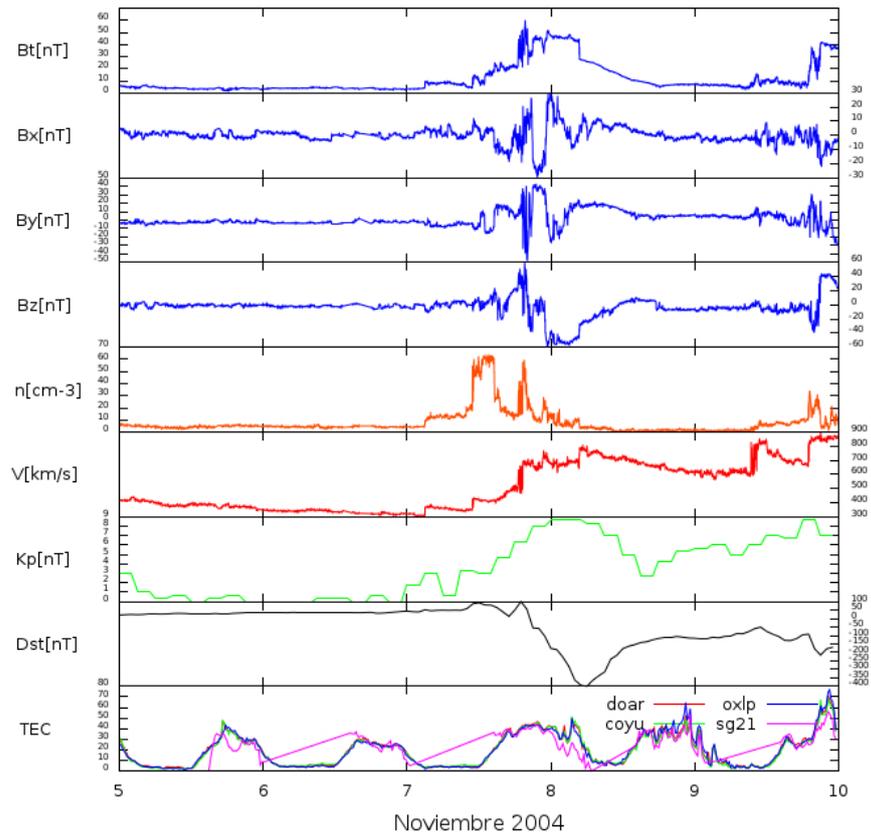


Figura 20: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Noviembre 2004.

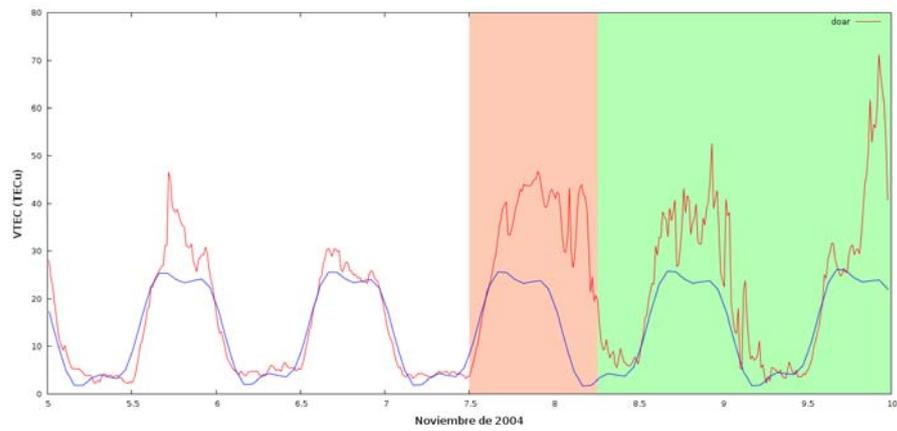


Figura 21: TEC obtenido para el evento de Noviembre 2004.

5.7 EVENTO DE DICIEMBRE 2004

Para el evento de Diciembre 2004 en la [Figura 22](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 67 nT a las 7.6 horas UT del día 5. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 63 cm^{-3} y 460 km/s respectivamente, después de una caída de hasta 390 km/s el día 6 la velocidad vuelve a presentar un aumento constante hasta llegar a los 550 km/s el día 7. El campo magnético total aumenta hasta alcanzar un pico de 37 nT a las 9.6 horas UT del día 5, la componente Bz alcanza un valor pico negativo de -10 nT que se mantiene hasta el día 7. El día 6 ocurre una tormenta geomagnética de -43 nT a las 18.9 horas UT. En la [Figura 23](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 16 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de 10 TECu el día 5 y 15 TECu el día 6 ambos incrementos durante la fase principal de la tormenta geomagnética.

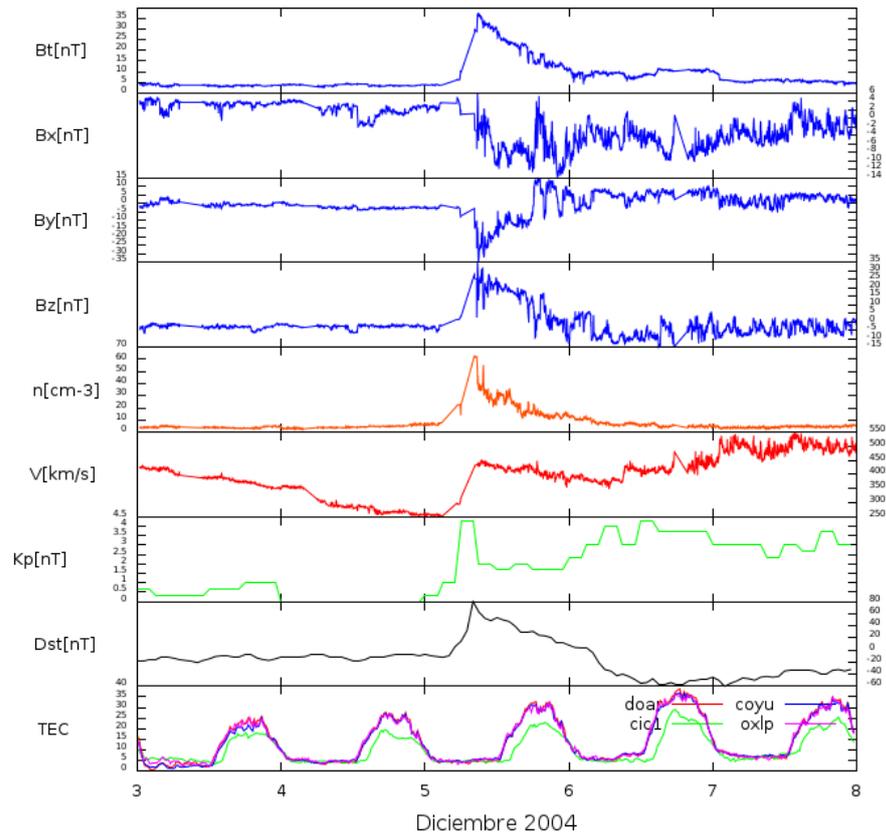


Figura 22: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Diciembre 2004.

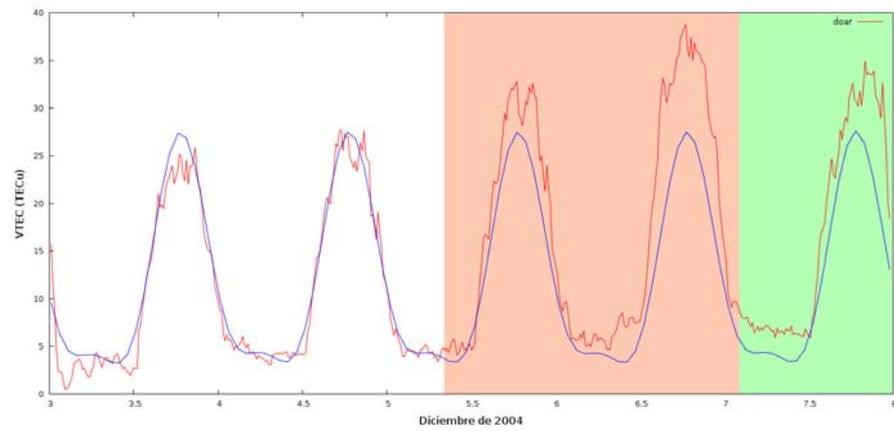


Figura 23: TEC obtenido para el evento de Diciembre 2004.

5.8 EVENTO DE MAYO DE 2005

Para el evento de Mayo de 2005 en la [Figura 24](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 52 nT a las 2.8 horas UT del día 15. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 27 cm^{-3} y 950 km/s respectivamente. El campo magnético total aumenta hasta alcanzar un pico de 55 nT a las 6 horas UT del día 15, la componente Bz alcanza un valor pico negativo de -47 nT a las 6.7 horas UT del día 15. El día 15 ocurre una tormenta geomagnética de -247 nT a las 8 horas UT. En la [Figura 25](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. Al final del día 15 y principios del día 16 se observa una disminución en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -21 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

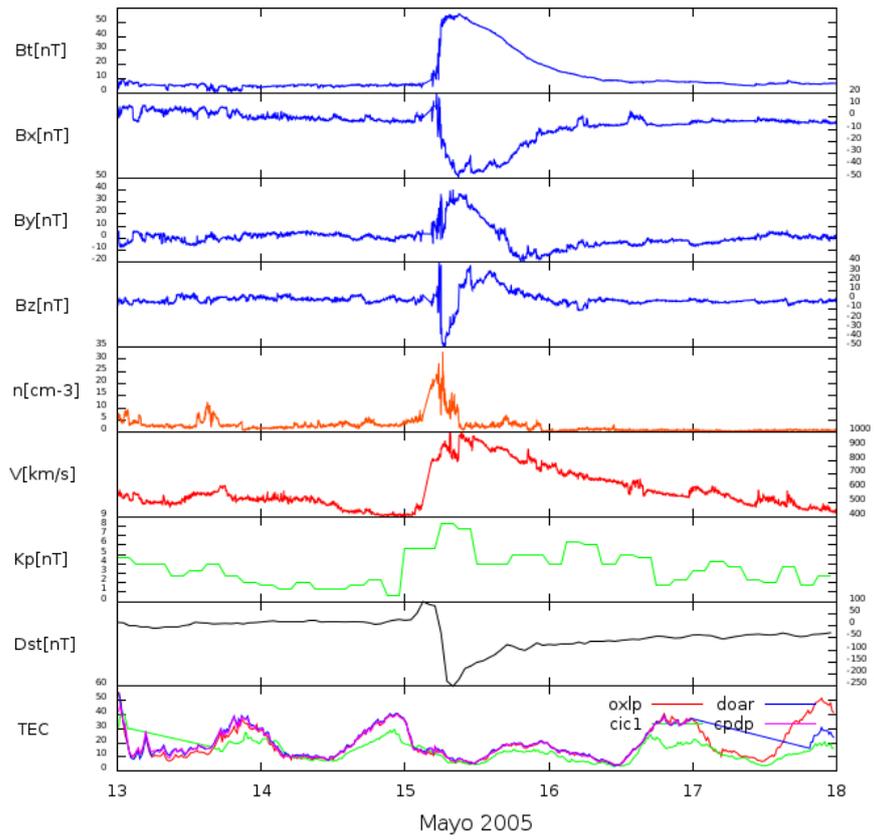


Figura 24: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Mayo de 2005.

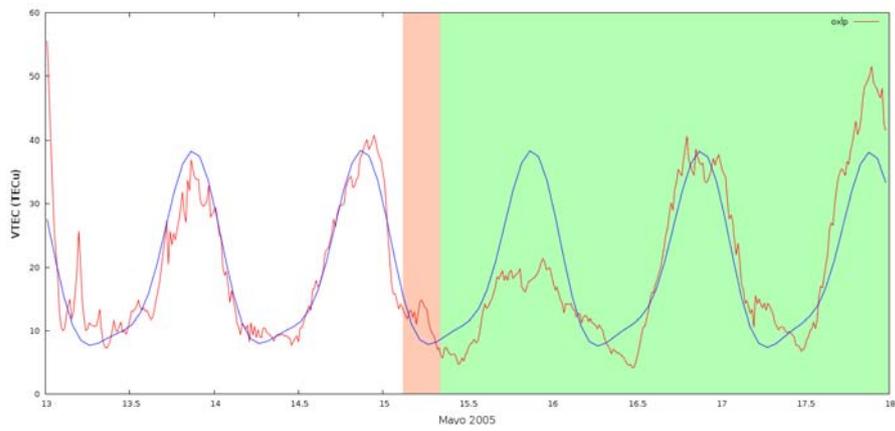


Figura 25: TEC obtenido para el evento de Mayo de 2005.

5.9 EVENTO DE FEBRERO DE 2011

Para el evento de Febrero de 2011 en la [Figura 26](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 51 nT a las 3.8 horas UT del día 18. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 56 cm^{-3} y 600 km/s respectivamente. La velocidad del viento solar muestra un segundo incremento con un valor pico de 750 km/s a las 10 horas UT del día 18. El día 18 ocurre una tormenta geomagnética de -30 nT a las 14.4 horas UT. En la [Figura 27](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 18 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -26 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

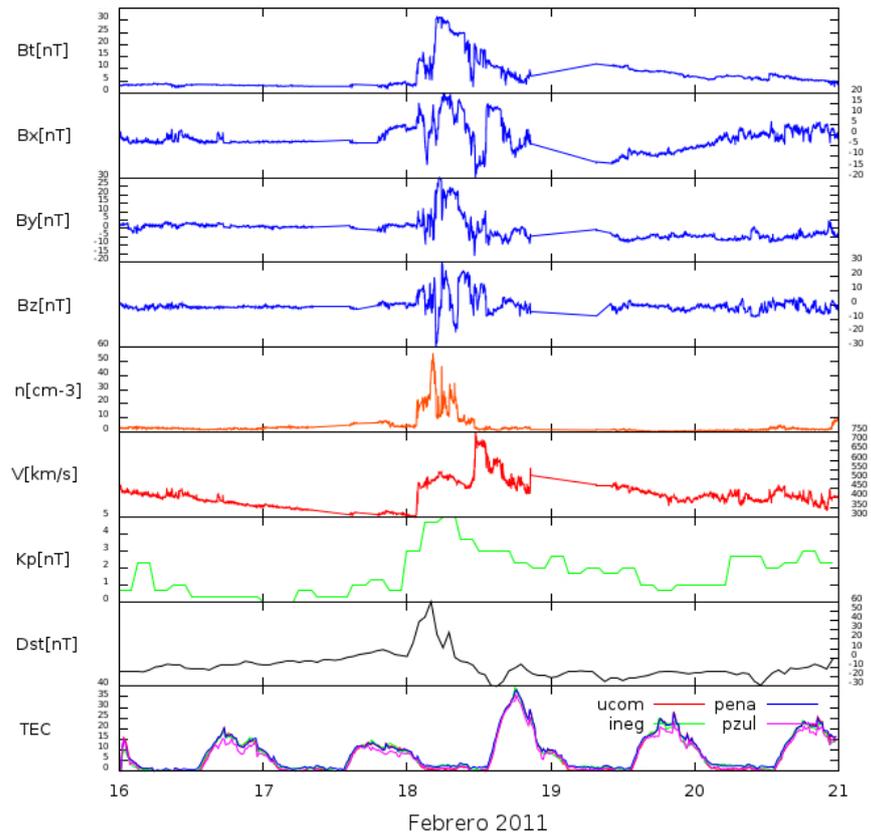


Figura 26: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Febrero de 2011.

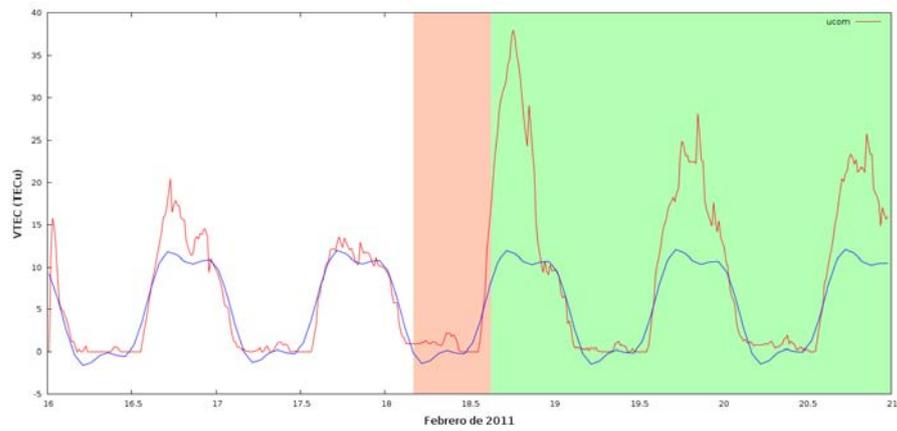


Figura 27: TEC obtenido para el evento de Febrero de 2011.

5.10 EVENTO DE ENERO DE 2012

Para el evento de Enero de 2012 en la [Figura 28](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 51 nT a las 7.2 horas UT del día 22. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 56 cm^{-3} y 460 km/s respectivamente. El día 22 ocurre una tormenta geomagnética de -69 nT a las 20 horas UT. En la [Figura 29](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. Al final del día 22 y principios del día 16 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -28 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

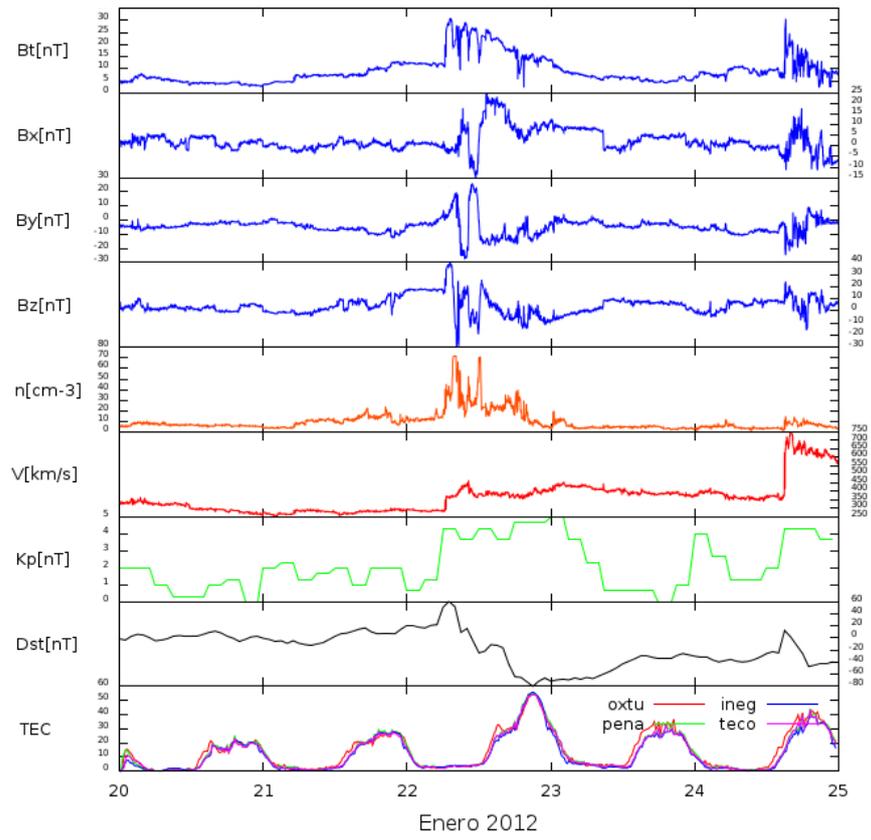


Figura 28: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Enero de 2012.

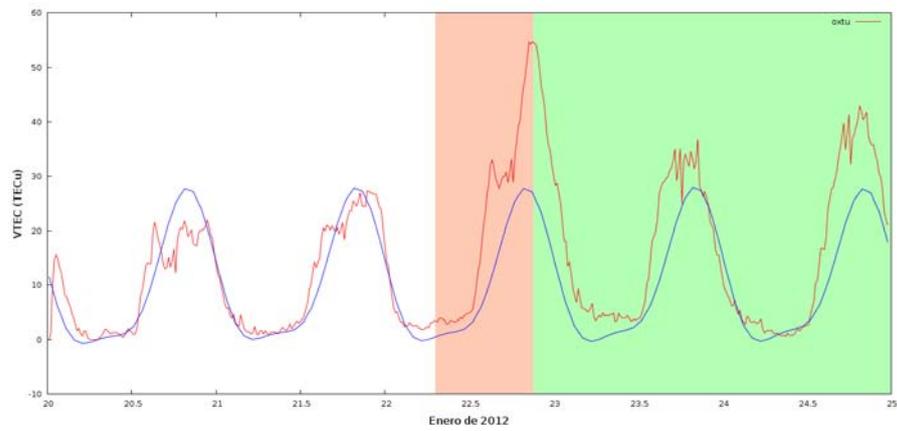


Figura 29: TEC obtenido para el evento de Enero de 2012.

5.11 EVENTO DE JUNIO DE 2012

Para el evento de Junio de 2012 en la [Figura 30](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 95 nT a las 22 horas UT del día 16. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 69 cm^{-3} y 510 km/s respectivamente. El campo magnético total aumenta hasta alcanzar un pico de 35 nT, la componente Bz alcanza un valor pico negativo de -71 nT a las 12 horas UT del día 17. El día 17 ocurre una tormenta geomagnética de -91 nT a las 12 horas UT. En la [Figura 31](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. Al final del día 17 y principios del día 18 se observa una disminución en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de -35 TECu durante la fase de recuperación de la tormenta geomagnética.

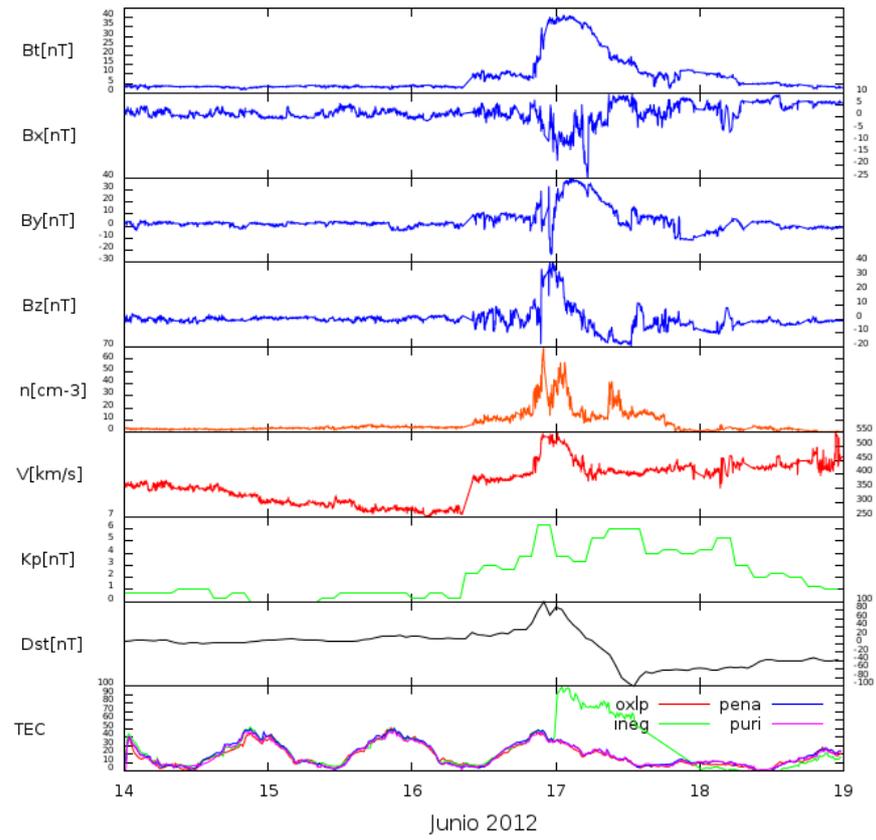


Figura 30: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Junio de 2012.

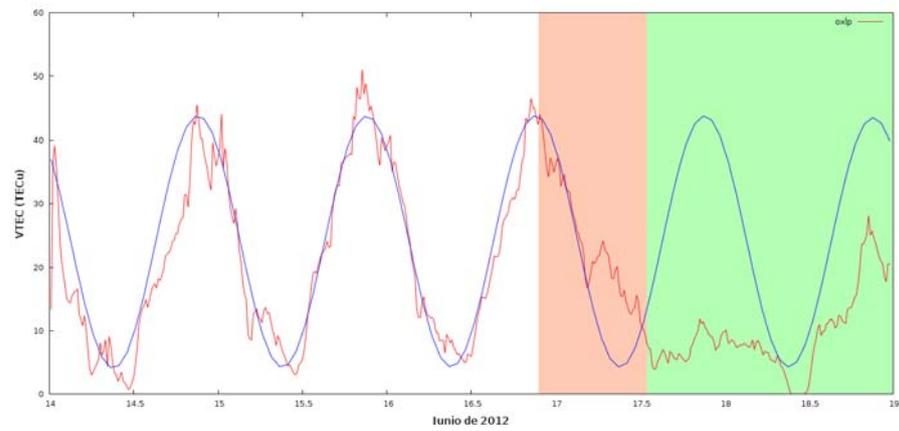


Figura 31: TEC obtenido para el evento de Junio de 2012.

5.12 EVENTO DE FEBRERO DE 2014

Para el evento de Febrero de 2014 en la [Figura 32](#) se muestran las componentes del campo magnético interplanetario (azul), la densidad de protones del medio interplanetario (naranja), la velocidad del viento solar (rojo, panel intermedio), el índice Kp (verde), el índice Dst (negro) y la variación diurna del TEC (panel inferior). El índice Dst muestra un aumento de hasta 52 nT a las 21.12 horas UT del día 15. Al mismo tiempo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores pico de 61 cm^{-3} y 450 km/s respectivamente. El día 17 ocurre una caída en el índice Dst de -22 nT a las 20 horas UT. En la [Figura 33](#) se muestra el comportamiento en la variación diurna del TEC (línea roja) en comparación al modelo esperado para un día tranquilo (línea azul), las barras naranja y verde corresponden a las fases principal y de recuperación de la tormenta geomagnética respectivamente. El día 16 se observa un aumento en la concentración de TEC en comparación al modelo con una diferencia máxima de 12 TECu durante la fase principal de la tormenta geomagnética.

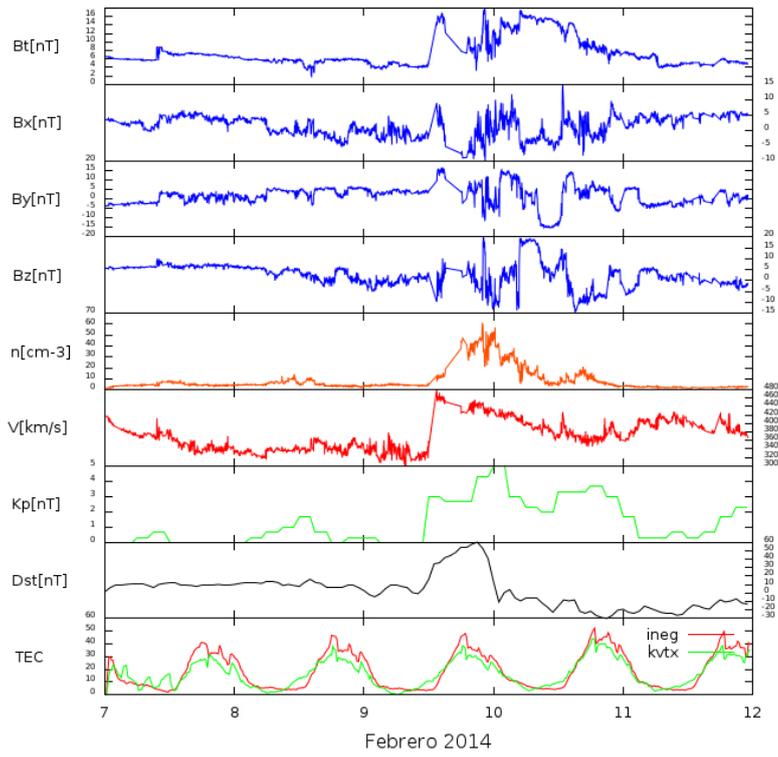


Figura 32: Componentes del viento solar e índices geomagnéticos para el evento de Febrero de 2014.

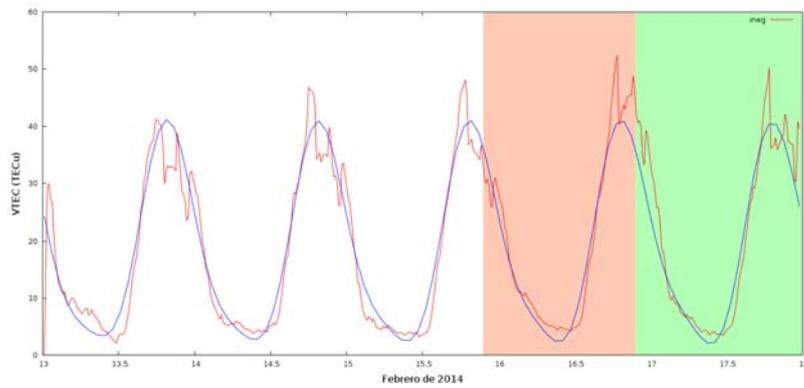


Figura 33: TEC obtenido para el evento de Febrero de 2014.

5.13 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para cuantificar los resultados obtenidos se construyó la [Tabla 2](#) que enlista los valores máximos en la densidad y velocidad del viento solar. Se clasificaron dos tipos de respuesta en la ionosfera dependiendo de su relación con el modelo para un día tranquilo, eventos con un aumento y eventos con una disminución en la amplitud de la variación diurna de TEC. Se tomó el valor de la diferencia máxima alcanzada entre el comportamiento de la ionosfera y el modelo en unidades TEC.

Tabla 2: Diferencias y máximos valores en la velocidad y densidad del viento solar (ver catálogos [Cane and Richardson \(2003\)](#); [Richardson and Cane \(2010\)](#)) para los eventos 32-43 y la diferencia máxima en TEC durante la actividad geomagnética siguiente en comparación a lo esperado.

Incremento en TEC					
Date	ΔV km/s	V_{\max} km/s	$\Delta\rho$ cm^{-3}	ρ_{\max} cm^{-3}	ΔTEC 10^{-14} e/cm^2
2000/07/13	200	670	32	35	32
2002/05/23	400	920	20	27	20
2004/11/07	140	720	50	62	42
2004/12/05	—*	—*	57	63	15
2011/02/18	130	600	52	56	26
2012/01/22	50	460	62	72	28
2014/02/15	100	450	57	61	12
Disminución en TEC					
1999/04/16	50	410	47	54	-38
2001//12/29	90	460	52	58	-20
2002/03/18	160	470	42	54	-13
2005/05/15	400	950	20	27	-21
2012/0616	80	510	63	69	-35

* Sin datos en los catálogos

Parte IV

DISCUSIÓN

DISCUSIÓN

En esta tesis se ha analizado el comportamiento de los eventos en los cuales el índice Dst alcanza valores iguales o superiores a 50 nT y el impacto de la actividad geomagnética posterior a estos eventos en la ionosfera. Se obtuvieron datos sobre el estado del medio interplanetario antes y después del incremento en el Dst para buscar un patrón que relacione el comportamiento entre el viento solar, la actividad geomagnética y la ionosfera. Debido a la escasez de datos GPS anteriores a 1999 el estudio se concentró únicamente en los eventos posteriores a esta fecha. En todos los casos las estaciones utilizadas para el cálculo del TEC presentaron el mismo comportamiento por lo que se puede decir que el comportamiento ionosférico encontrado es representativo de las perturbaciones en la ionosfera sobre el territorio mexicano durante los eventos analizados. Se encontró que de acuerdo a lo propuesto por [Kennel et al. \(1985\)](#), los choques en el medio interplanetario causan compresión en la densidad del plasma y campo magnético, además estos aumentos en la densidad causan compresión en la magnetosfera provocando impulsos repentinos (SI+) ([Araki et al., 1993](#); [Echer et al., 2005](#); [Tsurutani et al., 2008a](#); [Tsurutani and Lakhina, 2014](#)). Esto de acuerdo con [Crooker et al. \(1992b\)](#); [Wu and Lepping \(2002\)](#); [Huttunen et al. \(2005b\)](#); [Richardson et al. \(2006\)](#); [Zhang et al. \(2007\)](#) quienes relacionan la componente Bz sur incluida en la firma del medio interplanetario que conducen a una tormenta geomagnética. Se presentaron datos que se han obtenido con relación a aumentos geomagnéticos anómalos en el índice Dst de 50 nT o más, lo cual indica que la magnetosfera sufre una compresión sin una eficiente reconexión.

De los 43 eventos en la [Tabla 1](#), 16 de ellos no están relacionados con alguna tormenta geomagnética con una fase principal con $Dst < -50$ nT. De hecho solo 5 eventos están relacionados con tormentas intensas con $Dst \leq -200$ nT. De la [Tabla 2](#) se observa que aproximadamente la mitad de los eventos analizados presentan un incremento en la amplitud en la variación diurna del TEC. El evento que muestra el mayor incremento es el de Noviembre de 2004 con 42 TECu más que su correspondiente día quieto. Esto es lo esperado ya que el evento es también el que presenta la tormenta geomagnética más intensa. Por el contrario; los eventos de marzo de 1999 y junio de 2012 presentan la mayor disminución con -38 y -35 TECu, respectivamente, en comparación con sus correspondientes días quietos. Estos dos eventos junto con el de mayo de 2005 muestran un comportamiento similar

en TEC, en el sentido de que la variación desaparece. Ya que estos eventos ocurren en verano, este comportamiento sería el esperado de acuerdo a lo propuesto por [Preolss \(1993\)](#) y [Fuller-Rowell et al. \(1996\)](#) quienes argumentan que estas disminuciones en el TEC o tormentas ionosféricas negativas son producidas por mecanismos entre ionosfera y termosfera, cambios en la composición neutra y vientos troposféricos que podrían causar variaciones en el TEC. Por otro lado [Araujo-Pradere et al. \(2002\)](#) relaciona estas variaciones negativas en TEC con la estación y la actividad geomagnética. Este no es el caso para los eventos de julio de 2000 y mayo de 2002, los cuales ocurren también en verano y muestran un incremento en la amplitud de la variación diurna de TEC. Por ello, que las condiciones del viento solar parecen influir en el carácter de la respuesta ionosférica.

En todos los eventos el aumento en el índice Dst está acompañado por picos en los valores de la densidad y velocidad del viento solar, lo cual significaría la presencia de un choque en la magnetósfera y de acuerdo con [Kennel et al. \(1985\)](#) esto provoca una compresión que se manifiesta en el aumento del índice Dst. En particular el índice Dst pareciera responder en mayor medida a los aumentos de densidad en el medio interplanetario; por ejemplo en el evento de diciembre de 2001 el Dst se muestra perturbado y con valores altos durante los días 28 y 29 lo que coincide con un periodo de alta densidad en el viento solar. El pico máximo de Dst coincide además con un aumento en la velocidad, pero a inicios del día 31 se observa el valor máximo alcanzado de la velocidad en el periodo analizado (velocidad de hasta 750 km/s) dado que la densidad es baja en ese momento, el índice Dst no logra un valor más allá de 20 nT. Para el evento de marzo de 2002 el índice Dst presenta un periodo con valores altos coincidiendo con el aumento en la densidad, y al igual que en el evento de 2001 se observa un pico en la velocidad el día 21, sin un aumento significativo en el Dst. En el evento de noviembre de 2004 los 2 valores máximos de Dst coinciden con los picos en el valor de la densidad. En el evento de febrero de 2011 el valor máximo de Dst coincide con el pico en densidad y con un aumento en la velocidad, pero el valor máximo de velocidad ocurre unas horas después, sin ningún efecto aparente en el Dst.

En cuanto al comportamiento de la ionosfera de los eventos de 1999, 2005 y 2012 se observa que al momento de ocurrir la disminución en TEC el campo magnético interplanetario presenta una configuración en la cual la componente Bx toma valores negativos y la componente By toma valores positivos. Para el evento de enero de 2012 esta configuración se presenta el día 22 y después se presenta la configuración contraria, esto es, Bx con valores positivos y By con valores negativos; en la ionosfera se observa que el TEC responde a estos cambios ya

que justo al ocurrir la seunda configuración $B_x(+)$ y $B_y(-)$ es cuando el valor de TEC se incrementa hasta 54 TECu. Esto podría significar que la orientación del campo eléctrico que penetra en la magnetósfera está relacionado con el carácter de la perturbación (Tsurutani et al., 2008b) ionosférica. Los resultados corroboran la hipótesis propuesta ya que a pesar de la moderada actividad geomagnética que sigue a los eventos con valores altos de Dst, la ionosfera muestra perturbaciones las cuales parecen estar relacionadas con la orientación del campo magnético interplanetario que llega a la Tierra.

Parte V

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Se observa que en todos los casos el incremento en el índice Dst como era esperado está acompañado de un frente de choque en el viento solar el cual al no tener las características necesarias para la penetración (B_z sur) causa una compresión en la magnetósfera y se manifiesta en el aumento positivo del índice Dst. En todos los eventos se encontró un comportamiento anómalo en la variación diurna del TEC durante la fase principal o en la fase de recuperación de la tormenta geomagnética en comparación con el estado de la ionosfera durante un día tranquilo. Estas variaciones podían ser aumento o disminución en la densidad de electrones. A diferencia de lo encontrado en la bibliografía el tipo de perturbación (aumento, disminución) no mostraba un patrón estacional, ya que ambos tipos se encontraron en los mismos meses de diferentes años. El tipo de perturbación debe ser mayormente debido a las condiciones del viento solar.

De acuerdo a los resultados se sugiere que mientras la componente del medio interplanetario responsable de la penetración es la B_z , las componentes B_x y B_y influyen en el tipo de perturbación debido a la penetración del campo eléctrico asociado [Tsurutani et al. \(2008b\)](#). El hecho de que eventos como los de marzo, mayo de 2005 y junio de 2012 presenten una disminución en su variación diurna está de acuerdo con las teorías acerca de la recombinación de material neutro en la ionosfera debido a la época del año en que ocurren. Sin embargo, eventos en la misma época como lo son mayo de 2002 y julio de 2000 los cuales presentan un aumento en la variación diurna; parecen indicar que las condiciones del viento solar influyen en el comportamiento de la ionosfera. Se encontró una posible relación entre las condiciones del viento solar y el carácter de la respuesta ionosférica sobre el territorio mexicano (aumento o disminución en el TEC) debido a la orientación del campo magnético interplanetario.

Parte VI

APÉNDICE

VELOCIDAD DE FASE

Suponiendo un sistema que consta de una cuerda homogénea que se la cual se hace oscilar en uno de sus extremos lo que provoca ondas viajando a lo largo de la cuerda en la dirección x . La oscilación de la cuerda esta dada por un oscilador armónico:

$$D(t) = A\cos(\omega t)$$

Se desea encontrar el desplazamiento $\psi(x, t)$ de una parte de la onda en la posición x , facilmente se puede encontrar el valor para $x=0$ que seria igual la función $D(t)$:

$$\psi(0, t) = D(t) = A\cos(\omega t) \quad (35)$$

Las ondas viajan a velocidad constante mientras que las propiedades del medio no se alteren, cuando las ondas que se propagan corresponden a un oscilador armónico esta velocidad se conoce como velocidad de fase v_ϕ . Se puede reconocer que movimiento de la onda en una posición x a un tiempo t será el mismo y tendrá la misma forma que en $x=0$ a un tiempo t_0 cuando la onda a viajado hasta la posición x a la velocidad v_ϕ :

$$t_0 = t - \frac{z}{v_\phi} \quad (36)$$

Se tiene la forma de una onda viajera sinusoidal:

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= \psi(0, t_0) \\ &= A\cos(\omega t) \\ &= A\cos\omega\left(t - \frac{z}{v_\phi}\right) \\ &= A\cos\left(\omega t - \frac{\omega z}{v_\phi}\right) \end{aligned} \quad (37)$$

Se puede observar que al fijar el valor de x , $\psi(x, t)$ es un oscilador armónico en el tiempo y al fijar t , $\psi(x, t)$ es un oscilador sinusoidal en el espacio, ambas condiciones corresponden a una onda sinusoidal estática de la forma:

$$\psi(x, t) = B\cos(\omega t)\cos(\alpha - kx) \quad (38)$$

Donde α es una constante. Para la condición donde t es fijo, la dependencia espacial de la onda esta dada por la ecuación 37 tiene la misma forma que la onda estacionaria en la ecuación 38. Si escribimos la onda viajera de la forma:

$$\psi(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (39)$$

Comparando las ecuaciones 37 y 39 se observa que una relación entre el número de onda k y v_ϕ :

$$k = \frac{\omega}{v_\phi} \quad (40)$$

La velocidad de grupo puede definirse por:

$$v_\phi = \frac{\omega}{k} \quad (41)$$

$$v_\phi = \lambda v \quad (42)$$

$$v_\phi = \frac{\lambda}{T} \quad (43)$$

$$\omega = 2\pi v/k = \frac{2\pi}{\lambda}/v = \frac{1}{T}$$

Para mayor detalle en el cálculo de la velocidad de fase ver [Crawford \(1968\)](#).

VELOCIDAD DE GRUPO

La superposición ψ de dos oscilaciones armónicas ψ_1 y ψ_2 con sus respectivas frecuencias ω_1 y ω_2 puede ser escrita como:

$$\psi_1 = A\cos(\omega_1 t) \quad \psi_2 = A\cos(\omega_2 t)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A\cos(\omega_1 t) + A\cos(\omega_2 t) \quad (44)$$

Definimos la frecuencia promedio y la frecuencia modulada como:

$$\omega_{\text{prom}} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \quad (45)$$

$$\omega_{\text{mod}} = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \quad (46)$$

Con los cuales podemos obtener nuevamente ω_1 y ω_2

$$\omega_1 = \omega_{\text{prom}} + \omega_{\text{mod}} \quad \omega_2 = \omega_{\text{prom}} - \omega_{\text{mod}}$$

Escribimos la ecuación 44 en términos de ω_{prom} y ω_{mod} :

$$\begin{aligned} \psi &= A\cos(\omega_{\text{prom}} t + \omega_{\text{mod}} t) + A\cos(\omega_{\text{prom}} t - \omega_{\text{mod}} t) \\ &= [2A\cos(\omega_{\text{mod}} t)]\cos(\omega_{\text{prom}} t) \end{aligned}$$

$$\psi = A_{\text{mod}}(t)\cos\omega_{\text{prom}} t \quad (47)$$

donde:

$$A_{\text{mod}}(t) = 2A\cos\omega_{\text{mod}} t \quad (48)$$

Para representar a una onda viajera $\psi_1(z, t)$ a partir de $\psi_1(0, t)$ es necesario reemplazar ωt por $\omega t - kz$. Reescribiendo la ecuación 44:

$$\psi(z, t) = A\cos(\omega_1 t - k_1 z) + A\cos(\omega_2 t - k_2 z) \quad (49)$$

Haciendo la misma sustitución en las ecuaciones 47 y 48:

$$\psi(z, t) = A_{\text{mod}}(z, t)\cos(\omega_{\text{prom}} t - k_{\text{prom}} z) \quad (50)$$

$$A_{\text{mod}}(z, t) = 2A \cos(\omega_{\text{mod}} - k_{\text{mod}}z) \quad (51)$$

con:

$$\omega_{\text{mod}} = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$$

$$k_{\text{mod}} = \frac{1}{2}(k_1 - k_2)$$

$$\omega_{\text{prom}} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$$

$$k_{\text{prom}} = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$$

Si t se incrementa en dt , z debe incrementar en dz , de esta manera el incremento $\omega_{\text{mod}}dt - k_{\text{mod}}dz$ permanece como cero:

$$\omega_{\text{mod}}dt - k_{\text{mod}}dz = 0$$

A partir de la condición anterior podemos obtener la velocidad de la modulación:

$$v_{\text{mod}} = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega_{\text{mod}}}{k_{\text{mod}}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

Como ω y k están relacionados mediante la relación de dispersión:

$$\omega = \omega(k)$$

Podemos escribir la velocidad de modulación usando esta relación y puede expresarse usando series de Taylor:

$$v_{\text{mod}} = \frac{\omega_{k_1} - \omega_{k_2}}{k_1 - k_2} = \frac{d\omega}{dk} + \dots \quad (52)$$

Podemos despreciar todos los términos excepto el primero, esta cantidad es llamada velocidad de grupo:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (53)$$

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN PLASMAS

A partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}$$

Donde $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ y $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$. En el vacío sin cargas o corrientes, las ecuaciones pasan a tener la forma:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (54)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (55)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (56)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (57)$$

Tomando el rotacional de la ecuación 56 y la derivada parcial de la ecuación 57:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{1}{c} \nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (58)$$

$$\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (59)$$

Uniendo las dos ecuaciones anteriores obtenemos:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{1}{c} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (60)$$

Asumiendo que las ondas se propagan solamente en la dirección x , \mathbf{B} y \mathbf{E} tienen un comportamiento sinusoidal de la forma $e^{i(kx - \omega t)}$:

$$\mathbf{B} = B e^{i(kx - \omega t)} \hat{x}$$

$$\mathbf{E} = E e^{i(kx - \omega t)} \hat{x}$$

Sustituyendo esto en la ecuación 60:

$$\omega^2 \mathbf{B} = -c^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{B}) = -c^2 [\mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}) - k^2 \mathbf{B}]$$

Como $\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{B} = 0$:

$$\omega^2 = k^2 c^2 \quad (61)$$

Esta relación entre ω y k es llamada "relación de dispersión". En un plasma con $\mathbf{B} = 0$ en la ecuación 57 hay que añadir el término de las corrientes y derivando obtenemos:

$$c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (62)$$

Nuevamente tomando el rotacional de la ecuación 56:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (63)$$

Asumiendo un comportamiento sinusoidal de la forma $e^{i(kx - \omega t)}$:

$$-k(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) + k^2 \mathbf{E} = \frac{i\omega}{\epsilon_0 c^2} \mathbf{J} + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E} \quad (64)$$

Como $\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$:

$$(\omega^2 - c^2 k^2) \mathbf{E} = \frac{-i\omega \mathbf{J}}{\epsilon_0} \quad (65)$$

Si consideramos que la corriente \mathbf{J} esta formada unicamente por el movimiento de los electrones:

$$\mathbf{J} = -nev_e \quad (66)$$

De la ecuación de movimiento de los electrones:

$$m \frac{\partial v_e}{\partial t} = -eE \quad (67)$$

$$v_e = \frac{eE}{im\omega} \quad (68)$$

Podemos escribir la ecuación 65 como:

$$(\omega^2 - c^2 k^2) \mathbf{E} = \frac{i\omega}{\epsilon_0} ne \frac{eE}{im\omega} = \frac{ne^2}{\epsilon_0} \mathbf{E} \quad (69)$$

El lado derecho de la ecuación corresponde a la frecuencia del plasma ω_p^2 y puede escribirse como:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (70)$$

Esta es la relación de dispersión para ondas electromagnéticas propagandose en un plasma. Para mayor detalle ver [Chen \(1984\)](#).

REFERENCIAS

- Abidin, H. Z. (1992). *Computational and geometrical aspects of on-the-fly ambiguity resolution*. University of New Brunswick (Canada). (Citado en la página 22.)
- Araki, T., Funato, K., Iguchi, T., and Kamei, T. (1993). Direct detection of solar wind dynamic pressure effect on ground geomagnetic field. *Geophysical Research Letters*, 20(9):775–778. (Citado en la página 55.)
- Araujo-Pradere, E. A., Fuller-Rowell, T. J., and Codrescu, M. V. (2002). STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model 1. Model description. *Radio Science*, 37:1070. (Citado en la página 56.)
- Beutler, G., Gurtner, W., Rothacher, M., Wild, U., and Frei, E. (1990). Relative static positioning with the global positioning system: Basic technical considerations. In Bock, Y. and Leppard, N., editors, *Global Positioning System: An Overview*, volume 102 of *International Association of Geodesy Symposia*, pages 1–23. Springer New York. (Citado en la página 22.)
- Cane, H. V. and Richardson, I. G. (2003). Interplanetary coronal mass ejections in the near-earth solar wind during 1996–2002. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A4):n/a–n/a. 1156. (Citado en las páginas xii y 51.)
- Chen, F. (1984). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Number v. 1 in *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer. (Citado en la página 70.)
- Crawford, F. (1968). *Waves: Berkeley Physics Course*, volume 3 of *Berkley physics course*. McGraw-Hill. (Citado en la página 66.)
- Crooker, N. U., Cliver, E. W., and Tsurutani, B. T. (1992a). The semi-annual variation of great geomagnetic storms and the postshock Russell-Mcpherron effect preceding coronal mass ejecta. *Geophysical Research Letters (ISSN 0094-8276)*, 19:429–432. (Citado en la página 4.)
- Crooker, N. U., Cliver, E. W., and Tsurutani, B. T. (1992b). The semi-annual variation of great geomagnetic storms and the postshock Russell-Mcpherron effect preceding coronal mass ejecta. *Geophysical Research Letters*, 19:429–432. (Citado en la página 55.)
- Dubach, J. and Barker, W. A. (1971). Charged particle induced ionization rates in planetary atmospheres. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 33:1287–1288. (Citado en la página 8.)

- Echer, E., Gonzalez, W. D., Lago, A. D., Vieira, L. E. A., Guarneri, F. L., Gonzalez, A. L. C., and Schuch, N. J. (2005). Interplanetary shocks and geomagnetic activity during solar maximum (2000) and solar minimum (1995-1996). *Advances in Space Research*, 36:2318–2322. (Citado en la página 55.)
- Feldman, U., Landi, E., and Schwadron, N. (2005). On the sources of fast and slow solar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)*, 110(A7). (Citado en la página 8.)
- Fuller-Rowell, T., Rees, D., Quegan, S., Moffett, R., Codrescu, M., and Millward, G. (1996). A coupled thermosphere-ionosphere model (ctim). *STEP Report*, 239. (Citado en la página 56.)
- Gende, M., Brunini, C., and Kleusberg, A. (1998). Use of a regional ionospheric model in gps geodetic applications. In Brunner, F., editor, *Advances in Positioning and Reference Frames*, volume 118 of *International Association of Geodesy Symposia*, pages 277–282. Springer Berlin Heidelberg. (Citado en la página 22.)
- 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 (ISSN 0148-0227)*, 99. (Citado en la página 4.)
- Huttunen, K. E. J., Schwenn, R., Bothmer, V., and Koskinen, H. E. J. (2005a). Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23. *Annales Geophysicae*, 23:625–641. (Citado en la página 4.)
- Huttunen, K. E. J., Schwenn, R., Bothmer, V., and Koskinen, H. E. J. (2005b). Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23. *Annales Geophysicae*, 23:625–641. (Citado en la página 55.)
- Karttunen, H. (2007). *Fundamental astronomy*. Springer Science & Business Media. (Citado en la página 7.)
- Kennel, C. F., Edmiston, J. P., and Hada, T. (1985). A quarter century of collisionless shock research. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 34:1–36. (Citado en las páginas 55 y 56.)
- Khazanov, G. V. and Glocer, A. (2014). Quantitative Analysis of Magnetosphere-Ionosphere-Atmosphere Coupling Processes in the Region of Electron Diffuse Aurora. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 1975. (Citado en la página 3.)
- Kivelson, M. G. and Russell, C. T. (1995). *Introduction to space physics*. Cambridge university press. (Citado en la página 9.)

- Klobuchar, J. A. (1997). Real-time ionospheric science: The new reality. *Radio Science*, 32:1943–1952. (Citado en la página 3.)
- Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophysical Journal*, 128:664. (Citado en la página 7.)
- Preolss, G. W. (1993). On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Annales Geophysicae*, 11:1–9. (Citado en la página 56.)
- Richardson, I. and Cane, H. (2010). Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996-2009): Catalog and summary of properties. *Solar Physics*, 264(1):189–237. (Citado en las páginas xii y 51.)
- Richardson, I. G., Webb, D. F., Zhang, J., Berdichevsky, D. B., Biesecker, D. A., Kasper, J. C., Kataoka, R., Steinberg, J. T., Thompson, B. J., Wu, C.-C., and Zhukov, A. N. (2006). Major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) generated by corotating interaction regions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 111:7. (Citado en las páginas 4 y 55.)
- Rybicki, G. B. and Lightman, A. P. (2007). *Fundamentals of Radiative Transfer*. Wiley-VCH Verlag GmbH. (Citado en la página 8.)
- Sergeev, V. A., Sormakov, D. A., and Angelopoulos, V. (2014). A missing variable in solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling studies. *Geophysical Research Letters*, 41:8215–8220. (Citado en la página 3.)
- Tandberg-Hanssen, E. and Emslie, A. G. (1988). *The physics of solar flares*, volume 14. Cambridge University Press. (Citado en la página 5.)
- Tariku, Y. (2015). Patterns of gps-tec variation over low-latitude regions (african sector) during the deep solar minimum (2008 to 2009) and solar maximum (2012 to 2013) phases. *Earth, Planets and Space*, 67(1). (Citado en la página 23.)
- Tsurutani, B., Echer, E., Guarnieri, F., and Kozyra, J. (2008a). CAWSES November 7-8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase. *Geophysical Research Letters*, 35:6. (Citado en la página 55.)
- Tsurutani, B. and Lakhina, G. (2014). An extreme coronal mass ejection and consequences for the magnetosphere and Earth. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 3064. (Citado en la página 55.)

- Tsurutani, B., Mannucci, A., Iijima, B., Abdu, M. A., Sobral, J. H. A., Gonzalez, W., Guarnieri, F., Tsuda, T., Saito, A., Yumoto, K., Fejer, B., Fuller-Rowell, T. J., Kozyra, J., Foster, J. C., Coster, A., and Vasyliunas, V. M. (2004). Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109:8302. (Citado en la página 3.)
- Tsurutani, B. T., Verkhoglyadova, O. P., Mannucci, A. J., Lakhina, G. S., Li, G., and Zank, G. P. (2009). A brief review of "solar flare effects" on the ionosphere. *Radio Science*, 44:0. (Citado en la página 3.)
- Tsurutani, B. T., Verkhoglyadova, O. P., Mannucci, A. J., Saito, A., Araki, T., Yumoto, K., Tsuda, T., Abdu, M. A., Sobral, J. H. A., Gonzalez, W. D., McCreddie, H., Lakhina, G. S., and Vasyliūnas, V. M. (2008b). Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of 30-31 October 2003. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 113:5311. (Citado en las páginas 57 y 61.)
- Wu, C.-C. and Lepping, R. P. (2002). Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 107:1314. (Citado en la página 55.)
- Zhang, J., Richardson, I. G., Webb, D. F., Gopalswamy, N., Huttunen, E., Kasper, J. C., Nitta, N. V., Poomvises, W., Thompson, B. J., Wu, C.-C., Yashiro, S., and Zhukov, A. N. (2007). Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996-2005. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 112:10102. (Citado en las páginas 3 y 55.)