

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



**ESTUDIO DE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS QUE HAN
AFECTADO A MÉXICO Y LOS EVENTOS QUE LAS
PROVOCARON**

POR

ANA MARÍA BAUTISTA HERNÁNDEZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA Y TECNOLOGÍAS AFINES**

SEPTIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Estudio de las Tormentas Geomagnéticas que han afectado a México y los
eventos que las provocaron**

Por

Ana María Bautista Hernández

Como requisito para obtener el Grado de
Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines

Eduardo Gerardo Pérez Tijerina
Director de Tesis

Pedro Corona Romero
Director de Tesis Externo

**Estudio de las Tormentas Geomagnéticas que han afectado a México y los
eventos que las provocaron**

Jurado examinador

Dr. Eduardo Gerardo Pérez Tijerina
PRESIDENTE

Dr. José Enrique Pérez León
SECRETARIO

Dra. Esmeralda Romero Hernández
VOCAL

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Subdirector de Estudios de Posgrado

Recuerda mirar a las estrellas y no a tus pies. Trata de encontrarle un sentido a lo que ves y pregúntate que hace que el Universo exista. Se curioso y no importa que tan complicada la vida parezca ser, siempre hay algo que puedes hacer para tener éxito, solo importa que no te des por vencido.

Stephen Hawking †

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a las personas e instituciones que han hecho parte de este proceso formativo y que me han brindado la oportunidad de llevar a cabo este trabajo de tesis.

Agradezco Al consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Infinitas gracias a mis directores de tesis al Dr. Eduardo Gerardo Pérez Tijerina y al Dr. Pedro Corona Romero que han tenido gran paciencia para enseñarme y han procurado en todo momento formar en mi un carácter científico. Gracias por la oportunidad que me han brindado. A lo mejor en condiciones “normales” las cosas hubieran salido mejor para todos, por eso mil gracias por apoyarme hasta el final.

Gracias a la Dra. Esmeralda Romero Hernández, por aceptar formar parte de mi comité de revisión, por sus consejos, comentarios y observaciones, que enriquecieron este trabajo de tesis.

Al Dr. Enrique Pérez, por formar parte de mi comité de revisión, por sus observaciones para mejorar este trabajo de tesis.

A la M.C. Adela Sánchez, por acompañarme e impulsarme en el transcurso de la maestría.

DEDICATORIAS

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi Madre

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo... pero principalmente gracias por ser MI MADRE.

A mi Hermano

Luis, por crecer a mi lado y ayudarme a ser todo lo que soy.

A mi Angelito

Dany †, que me enseñó a querer, a soñar, a reír y al que siempre le contaba mis anhelos, te extraño tanto Hermano no hay un solo día desde tu partida que no deje de pensar en ti.

A mis amigos

Que de forma directa e indirecta estuvieron atentos a este proceso, apoyándome en todo momento. En especial a los que emprendimos a esta aventura, a Itzel y a Eunice, les agradezco infinitamente todos los momentos, sonrisas y consejos. A mis amigos de siempre, por su amistad incondicional, ya que ni la distancia ni el tiempo han logrado romper los lazos de amistad que siempre nos han unido y hacer de cada momento inolvidable.

Y a todas aquellas personas que mi cabeza no pudo extraer de mi memoria, muchas gracias por su apoyo, su tiempo y su cariño.

GRACIAS...

ÍNDICE GENERAL

	PAG.
ÍNDICE FIGURAS.....	I
ÍNDICE TABLAS.....	III
NOMENCLATURAS	IV
RESUMEN.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. El Sol.....	2
1.1.1.1 Atmósfera Solar.....	4
1.1.1.2 Viento Solar.....	4
1.1.2 Actividad Solar.....	5
1.1.2.1 Campo Magnético Solar.....	6
1.1.2.2 Ciclo de Manchas Solares	6
1.1.2.3 Fenómenos de Actividad Solar.....	7
1.1.3 Eventos de Gran Escala	9
1.1.3.1 Regiones de Interacción de Corrientes.....	9
1.1.3.2 Eyecciones de Masa Coronal.....	11
1.2 Clima Espacial: Relación Sol-Tierra.....	12
1.2.1 El ambiente espacial terrestre.....	14
1.2.1.1 Medio interplanetario cercano a la Tierra.....	14
1.2.1.2 Campo Geomagnético.....	16
1.2.1.3 Ionósfera terrestre.....	17
1.3 Tormentas Geomagnéticas.....	19
1.3.1.1 Faces de las tormentas geomagnéticas.....	20
1.3.1.2 Efecto de las Tormentas Geomagnéticas.....	21
1.3.1.3 Perturbaciones Ionosféricas y TEC.....	23
1.4 Índices de Actividad Geomagnética.....	26
1.4.1.1 Índice Dst.....	26
1.4.1.2 Índice Kp.....	28
1.4.1.3 Índices regionales mexicanos.....	29
1.5 Motivación de esta Tesis.....	31

2. MATERIALES Y METODOS	32
2.1 Datos in-situ del Viento Solar.....	32
2.2 Datos de índices de Actividad Geomagnética.....	33
2.3 Datos de TEC.....	34
2.4 Criterios de Análisis de Casos de Estudio.....	34
3. RESULTADOS	38
3.1.1 Casos de Estudio	39
3.1.2 Criterios de Selección.....	39
3.1.3 Eyecciones de Masa Coronal.....	41
3.1.4 Regiones de Interacción de Corrientes.....	58
3.2 Efectos Regionales.....	70
4. DISCUSION	71
5. CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Estructura Interna y Manifestaciones del Plasma.....	3
2.	Rotacion de los Polos Magneticos del Sol a lo largo de un Ciclo Solar.....	7
3.	Figura 3: Ráfaga solar de clase X del 06 de Septiembre de 2017.....	8
4.	Figura 4: Formación de una región interacción en el medio interplanetario, vista desde el polo Norte del sol.....	10
5.	Figura 5: Esquema de una Eyección de Masa Coronal interplanetaria (ICME).....	10
6.	Figura 6: Eyección de CME vistas a través de LASCO el día 6 y 10 de Septiembre del 2017.....	11
7.	Figura 7: Contorno de una EMC antes de un choque interplanetario y el campo magnético que desvía al viento solar.....	13
8.	Figura 8: Región de partículas cargadas en el espacio cercano a la Tierra.....	15
9.	Figurara 9: Campo magnético de la Tierra que protege nuestro planeta de partículas solares.....	16
10.	Figura 10: La atmosfera neutra y su división de capas.....	18
11.	Figura 11: Fases de la tormenta geomagnética de septiembre del 2017.....	21
12.	Figura 12: Tecnología e infraestructura afectadas por eventos climáticos espaciales.....	22
13.	Figura 13: Estructura vertical de la ionosfera terrestre.....	25
14.	Figura 14 Distribución de los observatorios del Dst.....	27
15.	Figura 15: Distribución de los observatorios del índice Kp.....	28
16.	Figura 16: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias y terrestres del 16 al 23 de marzo 2015.....	42
17.	Figura 17: Índice local Kmex del 17 de Marzo del 2015.	43
18.	Figura 18: Grafica del índice dH, para el evento de Marzo del 2015.	44
19.	Figura 19: Datos TEC, durante el evento de Marzo del 2015.....	45

20.	Figura 20: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias y terrestres del 20 al 26 de Junio 2015.	47
21.	Figura 21: Grafica del índice Kmex para el evento de Junio del 2015.....	48
22.	Figura 22: Grafica del índice dH para el evento de Junio del 2015.....	49
23.	Figura 23: TEC obtenido para el evento de Junio del 2015.....	49
24.	Figura 24: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias y terrestres del al 6 de Marzo 2016.....	51
25.	Figura 25: Índice Kmex regional para el evento de Marzo del 2016.....	52
26.	Figura 26: Índice dH regional para el evento de Marzo del 2016.....	52
27.	Figura 27: TEC obtenido para el evento de Marzo del 2016.	53
28.	Figura 28: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias y terrestres del Septiembre 2017.....	55
29.	Figura 29: Grafica del índice Kp, para el evento de Septiembre del 2017.....	56
30.	Figura 30: Grafica del índice dH, para el evento de Septiembre del 2017.....	57
31.	Figura 31: TEC obtenido para el evento de Septiembre del 2017.....	57
32.	Figura 32: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias y terrestres del al 7 de Octubre 2015.....	59
33.	Figura 33:Grafica del índice Kmex para el evento de Octubre del 2015...	60
34.	Figura 34: Grafica del índice dH, para el evento de Octubre del 2015....	60
35.	Figura 35: TEC Obtenidos 27 días previos al evento de Octubre del 2015.....	61
36.	Figura 36: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias una región de interacción a partir del día 17/12/2015 al 23/12/2015.	63
37.	Figura 37: Grafica del índice Kmex, para el evento de Diciembre del 2015.....	64
38.	Figura 38: Grafica del índice dH, para el evento de Diciembre del 2015...	64
39.	Figura 39: TEC obtenido para el evento de 19 de Diciembre del 2015...	65

40.	Figura 40: Mediciones <i>in-situ</i> interplanetarias en una región de interacción, a partir de 11/10/2016 al día 16/10/2016.....	67
41.	Figura 41: Grafica del índice Kmex para el evento de Octubre del 2016...68	
42.	Figura 42: Grafica del índice dH, para el evento de Octubre del 2016.....	68
43.	Figura 43: Datos de la Ionosfera terrestre de acuerdo a mediciones realizadas en el centro de México.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Tabla 1: Parámetros solares.....	2
II.	Tabla 2: Propiedades del viento solar.	5
III.	Tabla 3: Clasificación de Tormentas Geomagnéticas en función de Dst.....	27
IV.	Tabla 4: Clasificación de las Tormentas Geomagnéticas en función del índice Kp.....	29
V.	Tabla 5: Inicio y fin de los eventos seleccionados.	35
VI.	Tabla 6: Identificación de las RIC.....	36
VII.	Tabla 7: Características para la identificar de EMC.....	37
VIII.	Tabla 8: Valores de los índices geomagnéticos el día en el que alcanzan el valor Dst Max.	39
IX.	Tabla 9: Selección de eventos EMC O CIR.....	40
X.	Tabla 10: EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas de Marzo del 2015.....	40

NOMENCLATURAS

ACE	Advanced Composition Explorer
CIR	Corotating Interaction Region
CME	Coronal Mass Ejection
CMT	Campo Magnetico Terrestre
Dst	Disturbance Storm Time Index
EUV	Extremo Ultravioleta
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GOES	Geostationary Operational Enviromental Satellite
ICME	Interplanetary Coronal Mass Ejection
IMF	Interplanetary Magnetic Field
IQD	International Quiet Day
Kp	Indice K Planetario
SDO	Solar Dynamics Observatory
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
TEC	Total Electron Content
UT	Universal Time

RESUMEN

Fecha de graduación: Septiembre, 2018.

Ana María Bautista Hernández

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Título del Estudio: **ESTUDIO DE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS QUE HAN AFECTADO A MÉXICO Y LOS EVENTOS QUE LAS PROVOCARON**

Número de páginas: 79

Candidato para el Grado de MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA Y TECNOLOGÍAS AFINES

Área de estudio: Astrofísica planetaria

Propósito y método del estudio:

La importancia del estudio del clima espacial reside en su interacción con las Eyecciones de Masa Coronal, el viento solar y los campos magnéticos generando tormentas geomagnéticas. El propósito del estudio es describir estos fenómenos mediante los datos de la actividad geomagnética y el viento solar, así como los datos del contenido total de electrones en la ionosfera, para identificar el grado de perturbación del campo geomagnético.

En la actualidad el estudio de clima espacial tiene un especial interés debido a su impacto en las comunicaciones

Contribuciones y conclusiones:

Se realizó el análisis de las firmas interplanetarias *in situ*, así como, de los índices regionales (Kmex, DELTA H y el TEC) (caso de México). Además, se describió las características más comunes de las Eyecciones de Masa Coronal y de las Regiones de Interacciones de Corriente al llegar a la Tierra.

Eduardo Gerardo Pérez Tijerina

DIRECTOR DE TESIS

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El clima espacial se conforma de las Eyecciones de Masa Coronal (CME), el viento solar y los campos magnéticos (Sol-Tierra), en conjunto son el origen de las tormentas geomagnéticas.

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) y creando disturbios 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).

Lo anterior es muy importante ya que las tormentas solares pueden influir en el rendimiento y la confiabilidad de los sistemas tecnológicos espaciales y terrestres que son críticas para el funcionamiento de la sociedad moderna. Además, afecta negativamente la intensidad de la señal de los satélites involucrados en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), redes de comunicación, navegación y distribución de energía eléctrica (Kelly, 2009).

Los fenómenos desarrollados en las capas bajas de la atmósfera, pueden dividirse en dos, fenómenos eléctricos y propagación de ondas.

En referencia al primero, cabe destacar que existe un acoplamiento electrodinámico entre la ionosfera y los fenómenos eléctricos como tormentas (Barta et al., 2015), relámpagos o Sprites (Davis & Johnson, 2005). Estos fenómenos generan corrientes en la parte baja de la atmósfera que a su vez se transmite en la ionosfera en la cual se ve reflejado con el incremento del TEC.

1.1. El Sol

El Sol es la estrella más cercana a nuestro planeta, con una temperatura superficial de 5700 °K, y está ubicado en el centro del sistema solar, la cual emite luz y energía en virtud de los procesos nucleares que ocurre en su interior (Casanchi, 2014). Sus componentes principales son el Hidrogeno (74.9%H) y Helio (23.8% He), en tanto que el porcentaje restante lo conforman el Oxígeno 1%, Carbono 0.3%, Hierro y Neón 0.2% (elementos más pesados) (Blanco Cano, 2009) (Blanco & Kajdic, 2014).

Además de que tiene un radio promedio de 7×10^5 km y se compone de un gas ionizado y neutro al que se le da el nombre de plasma (Saha, 2008). En la figura 1, describen las características del Sol y el valor aproximado de la masa, radio distancia y temperatura.

CARACTERISTICA	VALOR
Masa (M_{\odot})	2×10^{30} Kg
Radio Solar(R_{\odot})	$R_{\odot} 6.96 \times 10^5$ km
Densidad media	1.4 kg/ m ³
Temperatura	6700 K
Distancia promedio Sol-Tierra (UA)	150 millones de Km (1 Unidad Astronómica) 1.49597×10^{11} m
Edad	4.6×10^9 años (está a la mitad de su vida)

Tabla 1: Parámetros solares. Adaptada de: Lang, 2001

El periodo de rotación en el ecuador es de ~ 26 días y a las regiones polares les toma casi 35 días. Para términos prácticos se le considera al periodo de rotación solar cerca del ecuador de una duración promedio de 27 días (Otaola et.al., 2003). La existencia de partículas ionizadas, por lo tanto (los electrones libres, hacen del gas un plasma cargado donde existen campos electromagnéticos.

El campo magnético juega un importante rol en el ámbito solar: una de las principales consecuencias de su existencia es su congelamiento. Este hecho se relaciona con el movimiento de las líneas de campo magnético producido por el movimiento del plasma y viceversa, el movimiento del campo magnético produce el movimiento del plasma.

El interior del Sol se divide en tres regiones segun los proceso fisicos que se llevan acabo.

- Núcleo: es la zona del Sol donde se producen la fusión nuclear debido a la alta temperatura aproximada de 10^7 K, y posee una presión $\sim 10^{11}$ atm (9). La energía es transportada a la superficie por medio de tres mecanismos: conducción, radiación y convección, la primera está presente en todo el sol pero no domina ninguna región, sin embargo las dos siguientes si, y dan nombre a las siguientes dos capas.
- Zona Radiativa: las partículas que transportan energía (fotones) intenta escapar al exterior en un viaje que puede durar unos 100,000 años debido a que estos fotones son absorbidos continuamente y enviados a otra dirección.
- Zona Convectiva: en esta zona se producen columnas de gas caliente que ascienden hasta la superficie, se enfrían y vuelven a descender.

En la figura 1, muestra el esquema de la estructura interna del Sol que nos muestra la disposición de distintas capas de su interior, así también de diversas estructuras de su atmosfera.



Figura 1: Estructura interna y las manifestaciones del plasma en su atmosfera (protuberancias, manchas solares, erupciones- Fuente:Nasa

1.1.1.1 Atmosfera Solar

El Sol es una esfera de gas caliente que no es homogénea; posee una estructura en capas concéntricas cada una con diferentes propiedades. La superficie del Solar es la zona mejor conocida debido que es observable en todas las longitudes de onda (Bravo, 2001). La atmosfera Solar se manifiesta una estructura muy compleja, compuesta por tres capas principales las cuales son:

- Corona: es la atmosfera del Sol y su capa más extensa, se hace visible durante los eclipses totales de Sol o utilizando dispositivos como el cronógrafo y es capaz de alcanzar miles de millones de kilómetros en espacio su temperatura es superior a los $1 \times 10^6 K$ (Bravo, 2001).
- Cromosfera: es la capa intermedia e irregular que se puede observar como un anillo rojo magneta que yace en las inmediatamente por encima de la fotosfera, mide entre 1000 y 8000 km de espesor. Su temperatura varía entre 4000k a unos $1 \times 10^6 k$ (Bravo, 2001).
- Fotosfera: es una capa delgada, de unos 300 Km de profundidad, que es la parte del Sol que nos da la luz del día por excelencia. Desde aquí se irradia luz y calor al espacio. La temperatura es aproximadamente de 5000K y por esta razón se observa de un color amarillo (Otoala et al., 1993). En esta capa es donde ocurren las manchas solares y las fáculas alrededor de ellas.

En estas regiones se llevan a cabo la actividad solar descritas más adelante.

1.1.1.2 Viento Solar

El espacio entre el Sol y los planetas no se encuentra vacío, sino que esta permeado por un plasma tenue y magnetizado, *viento solar*.

El viento solar (VS) es un flujo de partículas de radiación y campo magnético provenientes del Sol que permean al medio interplanetario. El VS es un plasma compuesto principalmente por electrones, protones y trazas de iones pesados (principalmente núcleos de Helio). Se produce debido a la gran diferencia de presión y densidad entre la corona del Sol y el medio interplanetario (Parker, 1958), también conocida como expansión coronaria.

La expansión del VS no atraviesa al medio interestelar debido a que su presión dinámica ya que conforme viaja en el medio interplanetario disminuye, llegando a hacer frenado por la presión dinámica interestelar. Por lo tanto el viento solar esta confinada en una burbuja llamada heliosfera (Burlaga, 1995).

De acuerdo con la velocidad, densidad, temperatura y campo magnético, existen dos tipos de viento solar: lento y rápido, se clasifican en base a su velocidad: el viento solar lento se expande radialmente con una velocidad promedio de 400 km/s, una temperatura de aproximada $1.5 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ y se origina comúnmente en las regiones de campo magnético cerrados (cascos coronales) (Harra et al.,2008).

Por el lado contrario, el viento solar rápido se origina en las regiones del campo magnéticamente abierto (hoyos coronales) el cual tiene una velocidad promedio de 750 km/s y una temperatura de $8 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$. El primero es dos veces más denso y más variable en intensidad que el segundo. Además, el viento solar lento tiene una estructura más compleja a mayor escala y con regiones de turbulencia (Feldman et al., 2005).

En la tabla1, muestra las propiedades típicas del viento solar a diferentes latitudes durante la fase mínima y máxima del ciclo solar hecha por la nave espacial Ulysses.

Propiedades	VS rápido	VS lento
Velocidad (part/cm ³)	700± 50 Km/s	400±50 Km/s
Densidad	~3	~10
Temperatura de protones (Tp)	~ 2 × 10 ⁵ K	~ 4 ×10 ⁴ K
Temperatura de electrones (Te)	~1 × 10 ⁵ K	~1.3 × 10 ⁵ K
Campo magnético	~3 nT	~3 nT

Tabla 2: Propiedades del viento solar. Tomada de: Gonzales-Esparza,2000.

1.1.2 Actividad Solar

Se ha comprobado que la actividad solar sigue periodos de 11 años de duración. Cada uno de estos periodos se denomina ciclo de manchas y puede identificarse por la polaridad magnética de las manchas solares: las manchas de un hemisferio solar determinado (Norte o Sur) tendrá la misma polaridad en el transcurso de un ciclo, mientras que las manchas del hemisferio opuesto tendrán polaridad inversa. Cuando termina cada ciclo solar de 11 años, el sol invierte su polaridad y las manchas a su vez invierten su orientación en los mínimos de cada ciclo solar el número de manchas Solares se reduce e incluso desaparecer. Y por lo tanto disminuye el número de tormentas solares

Para el estudio del clima espacial, así como sus efectos en la Tierra, es esencial estudiar la actividad solar.

La actividad solar se debe a los procesos físicos que ocurren en la atmósfera del Sol para ser más precisos en la corona del Sol. En esta región se presentan cambios morfológicos y energéticos, principalmente de origen magnético que origina la formación de regiones donde se llevan a cabo fenómenos de actividad solar llamadas regiones activas. El campo magnético de la actividad solar es muy intenso.

Los fenómenos de actividad solar se debieron a la aparición de manchas solares ya que pueden formarse y disiparse en periodos comprendidos entre varios días y pocas semanas y rotan con el resto de la superficie solar

1.1.2.1 Campo Magnético Solar

El campo magnético solar se ha estudiado en base al número de manchas solares. La alta conductividad del plasma solar hace que el campo magnético de la Tierra se ha arrastrado por el viento solar formando una cavidad llamada magnetosfera que da 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 da como resultado la formación de auroras (Sergeev et al.,2014; Khazanov & Glozer,2014).

1.1.2.2 Ciclo de Manchas Solares

Las manchas, son indicadores de un campo magnético inestable desde el interior del Sol, donde pueden ocurrir la EMC y la ráfaga. Estas manchas están ligadas al ciclo de ~11 años y son producidas por torceduras de campos magnéticos sobre la superficie solar, dejando un aparente hueco donde la temperatura es ~1000K más fría comparada con el resto de la superficie solar (Forcada S.J.,2013).

Para entender el ciclo con los eventos solares es necesario describir el campo magnético del Sol, el cual diferencia de la Tierra, que tiene una rotación norte-sur similar al de un imán (dipolo magnético), presenta un comportamiento mucho más dinámico, en el sentido en que las líneas de campo van evolucionando y “retorciéndose” entre si por lo que al final terminan por “reconfigurarse” volviendo de nuevo a la situación inicial de una orientación Norte-Sur (Solanki et al.,2008). La posición de las manchas varía en forma latitudinalmente. A medida a que el ciclo avanza, la latitud promedio de las manchas decrecimiento, aglomerándose muy cerca del Ecuador solar en una forma particular en ambos hemisferios. Al observar que la velocidad con la que se movían estas manchas diariamente eran

mayor a las latitudes ecuatoriales que a las latitudes más altas, se llegó a la conclusión que el sol rotaba diferencialmente (Wilson.R.P.,1994).

En la figura 2, muestra la rotación hace que los polos magnéticos del Sol se inviertan cada 11 años, el Norte se vuelve Sur y el Sur Norte. Así, cada 22 años los polos regresan a su posición original.

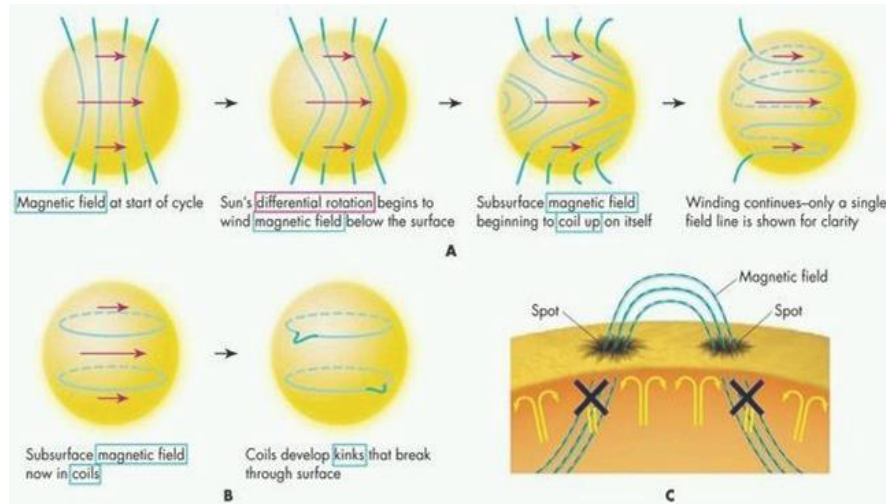


Figura 2: Rotación de los polos Magnéticos del Sol a lo largo de un ciclo solar. Cortesía de: la University of Massachusetts.

1.1.2.3 Fenómenos de Actividad Solar

- Las llamaradas pueden observarse con instrumentos ópticos desde la Tierra o desde sondas espaciales y dan lugar a intensos niveles de ruido en las bandas de radio de HF. Algunas llamaradas liberan gran cantidad de protones que pueden alcanzar a la Tierra en cuestión de 30 minutos. Al llegar a la Tierra, comienzan a moverse siguiendo una trayectoria espiral a lo largo de las líneas del campo geomagnético, penetrando en las capas altas de la ionosfera y por ende aumenta los niveles de ionización.
- Protuberancias, aparecen en el disco solar o limbo y se extiende hacia a fuera. Se observa como flamas que se proyectan más allá del limbo, además sus estructuras consisten en arcos de plasma de gran tamaño que se establecen en la corona solar y pueden durar meses. Además estallan como filamentos de gas incandescente entrelazado y a su vez envían grandes cantidades de materia al medio interplanetario (Otaola et al.,2003).

- Hoyos coronales, se visualizan como zonas oscuras en la corona solar, presentando una emisión en rayos X muy baja debido a que el material puede moverse de manera libre y escapa rápidamente al espacio en forma de viento solar, a lo cual puede a una velocidad de hasta 1000km/s. Estas estructuras muestran variaciones con el ciclo solar, durante la actividad mínima solar los hoyos coronales ocupan grandes regiones y se encuentran centrados en los polos. Y durante mayor actividad solar se contraen y aparecen mas pequeños durante periodos cortos (Otaola et al.,2003).
- Ráfagas solares (flares), Las ráfagas solares son eventos son explosiones de gran intensidad que se producen en el sol y que liberan enormes cantidades de materia y radiación en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético (ver figura 3). Pueden ser identificados por su emisión en luz visible, por el aumento en la línea de H α . Las ráfagas se clasifican como: A, B, C, M o X según del flujo de rayos X (W/m^2) (Holman G. & Benedict S.,1996). Siendo las letras A y B las que muestran un flujo débil y las C, M y X muestras flujos más intensos.



Figura 3: Ráfaga solar de clase X del 06 de Septiembre de 2017 Fotografía tomada por la NASA Solar Dynamics Observatorio (SDO) en extremo de la luz. Ultravioleta (131 Angstrom). Fuente: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News080911-xclass.html:

1.1.3 Eventos de Gran Escala

Existen dos tipos de flujos que dominan la dinámica de gran escala del medio interplanetario, las regiones de interacción de corriente (CIR) y las eyecciones de masa coronal. Las regiones fuente de corrientes de corrientes rápidas y lentas son los hoyos coronales y la rotación solar, las eyecciones, en las que gran cantidad es expulsada al medio interplanetario.

1.1.3.1 Regiones de Interacción de Corriente

Una región de interacción de corriente de viento solar (Stream Interaction Region, SIR/CIR) está formada por la interacción del viento solar rápido que se origina en un agujero coronal que se apodera del viento solar lento (Gosling et al., 1981). Debido a que los vientos lentos y rápidos son dos plasmas con diferentes orígenes magnéticos, es por ello por lo que existe una interfaz de corriente entre ellos y dos ondas de choque que pueden formar un choque directo que se propaga en el viento lento y un choque inverso que se propaga en el viento solar rápido, ambos se transportan hacia afuera, (Smith & Wolfe, 1976, Pizzo, 1985).

En la figura 4, interacción forma una región de plasma comprimida a lo largo del borde principal de la corriente, debido a la rotación del Sol, se asemeja a la espiral de Arquímedes.

Dado que los agujeros coronales tienden a durar varios meses las regiones de interacción y las corrientes de viento solar rápido llegan lentamente con un primer aumento constante en la densidad del viento solar en el transcurso de un par de horas. Este aumento de la densidad del viento solar se produce porque el viento solar más rápido agrupa las partículas de viento solar más lentas frente a él. Este fenómeno a menudo se denomina región de interacción de corriente (SIR) o como región de interacción co-rotativa (CIR) y casi siempre se asocia con un aumento en la fuerza total (B_z) del campo magnético interplanetario (Ian G. Richardson, 2017).

La causa de esto es la pérdida de partículas en la corriente de anillo meramente por procesos físicos como la aceleración de electrones relativistas y de partículas inyectadas en un proceso continuo (González et al., 1999); Tsurutani et al., 2006). Las CIR y los choques son una fuente importante de aceleración de partículas energéticas en el medio interplanetario. Durante el mínimo solar cuando las CME es baja los CIR son la fuente dominante de las partículas energéticas en el medio interplanetario (Gosling y Pizzo 1999; Mason y Sanderson 1999; Scholer 1999; Richardson 2004).

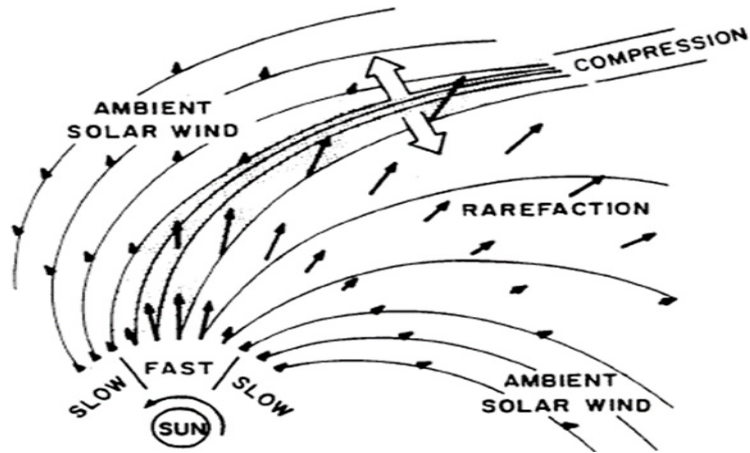


Figura 4: Formación de una región interacción en el medio interplanetario, vista desde el Polo Norte del sol. Tomada de: Pizzo, 1978.

En la figura 5, muestra la formación de interacción de una región en dos dimensiones sobre el plano de la eclíptica. Dado que una región surge el viento rápido y en otra región el lento.

Existe una discontinuidad dentro de la región de interacción la discontinuidad es la interfaz de corriente. Además, como el viento lento, tiene mayor densidad a lo que se caracteriza por un incremento en la densidad y en contraste con el viento rápido, tiene una mayor temperatura que incrementa (González Esparza, 1999).

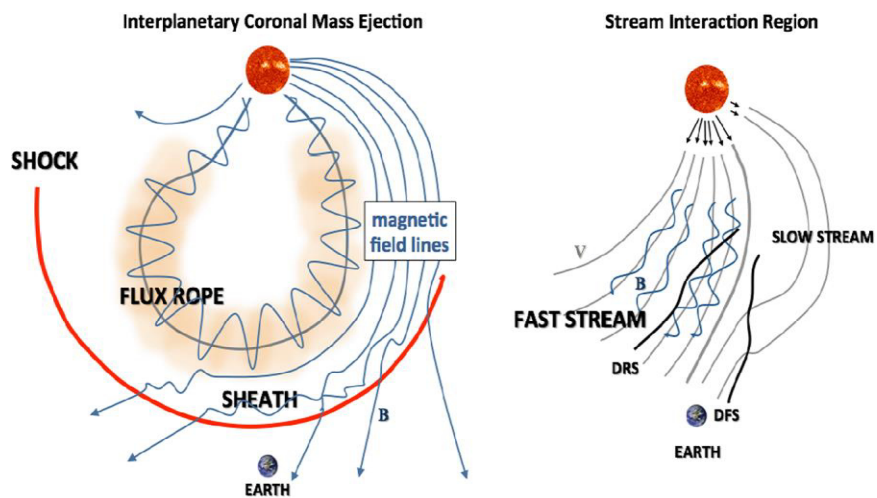


Figura 5: Esquema de una Eyección de Masa Coronal interplanetaria (ICME) y una región de interacción de corriente. Kilpua et al., 2017.

1.1.3.2 Eyecciones de Masa Coronal

Las eyecciones de masa coronal son grandes estallidos que consta en la expulsión repentina de nubes densas de plasma desde la atmósfera exterior del sol, moviéndose a gran velocidad al medio interplanetario (IM) (Gonzales,2000). Sus características varían de minuto a horas, el tamaño es de varios radios solares R_s . Se expanden radialmente desde el Sol, a velocidades, de hasta 3000Km/s del orden de decenas de kilómetros por segundo, impactando en los planetas del sistema solar y en los satélites artificiales. Las eyecciones juegan un papel importante en la evolución de la estructura de la corona solar y es un en lance primario entre la actividad del solar y los transitorios interplanetarios, así como las perturbaciones geomagnéticas (Aguilar,2001).

Este tipo de CME son las más grandes perturbaciones del campo magnético terrestre, es por ello que su estudio es trascendente para el clima espacial. Cuando se llegase a presentar esta interacción con la magnetosfera terrestre, se les llama CME de tipo Halo. Estas se aprecian como un brillo que se expande y rodea al disco de ocultación del cronógrafo.

Las CME de tipo halo son la principal causa de las tormentas geomagnéticas de gran tamaño (Xie et al.,2004),(Burlaga et. al.,2002); así mismo la estructura más geo efectiva es la funda (Ontiveros & Gonzales-Esparza,2010).

En la figura 6, se muestra una CME, ocurrida en Septiembre del 2017.

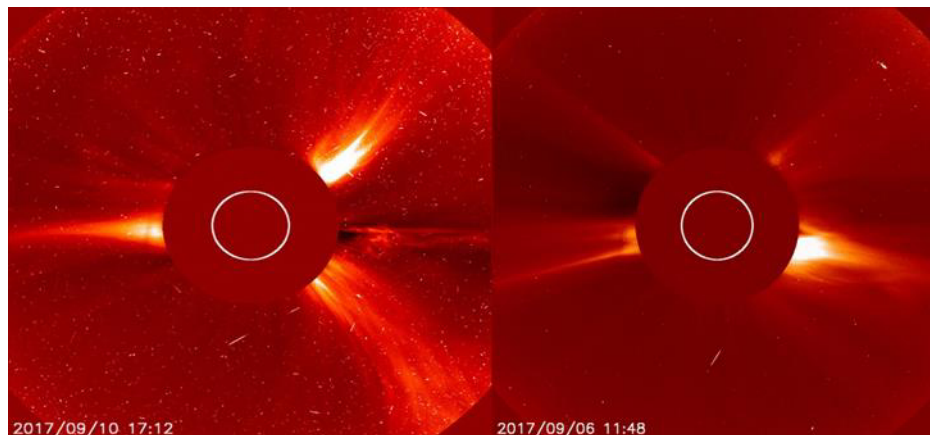


Figura 6: Eyección de CME vistas a través de LASCO el día 6 y 10 de Septiembre del 2017. Tomado de SOHO NASCOM Gallery.

Resultando más frecuentes los fenómenos transitorios que producen la actividad geomagnética cuando proceden de fuentes solares del hemisferio occidental (Xie et al., 2004).

La CME, al ser expulsada del Sol, interacciones con el medio interplanetario. A estas estructuras que están en el medio interplanetario. El viento solar y la CME son plasma con alta conductividad, no se mezclan, interactúan entre sí, dada la diferencia de velocidades entre las CME y el medio, estas se empujan o retrasan, provocando discontinuidades entre los bloques de plasma (Tinoco, 2005).

Si la velocidad es mayor a la del viento solar ambiente, se generará un frente de choque y, detrás del mismo el plasma se densificará y calentará conformando una estructura llamada funda. Esta región contiene viento solar caliente y comprimido, por lo que presenta a la densidad y un campo magnético desordenado y con un incremento en su magnitud, con una B del plasma frecuente < 1 debido a una fuerte componente magnética. La velocidad de estas eyecciones puede variar en dos órdenes de magnitud, de ~ 20 km/s a más de 2500 km/s de pende de la fase del ciclo solar que ocurra. Para el mínimo solar, las velocidades son cercanas a los 300 km/s, en tanto que el máximo solar es de 500 km/ (Gopalswamy N. et al., 2014).

1.2 Clima Espacial: Relación Sol-Tierra

Los fenómenos que ocurren en el sol y en la Tierra son independientes una de la otra. Pues indiscutiblemente lo que ocurre en es que, el Sol controla al clima espacial, debido a la inestabilidad del plasma. Este plasma solar produce ráfagas solares y Eyecciones de Masa Coronal. A lo que estos bloques de plasma solar calientes, viaja en el espacio e interactúan con la magnetosfera de la Tierra.

La magnetosfera de nuestro planeta nos protege de las partículas cargadas expulsadas del Sol durante las tormentas solares (ver figura 7). Sin embargo, algunas de estas partículas pueden influir a lo largo de las líneas de campo magnético de la Tierra hacia la atmósfera superior e inducir tormentas geomagnéticas. Uno de los efectos que se manifiestan en la tierra, debido a la actividad dinámica del Sol, son: las auroras (boreales y australes). Cuando estas partículas entran a la atmósfera superior, colisionan y excitan átomos de oxígeno y nitrógeno, creando los colores brillantes que podemos ver a simple vista (M. Moldwin, 2008).

De estas manifestaciones las tormentas geomagnéticas son las que causan mayores problemas a la Tierra. El encuentro entre plasmas magnéticas expulsadas por el Sol y el campo magnético terrestre desencadenando violentas fluctuaciones en los niveles del magnetismo Terrestre (Tormentas Geomagnéticas), que llegan a interrumpir y dañar a los sistemas de comunicación y a líneas de transmisión de energía eléctrica. Estas plasmas de

energía producida por el sol logran penetrar el escudo geomagnético e inyectan sus partículas energéticas, produciendo una excitación de los sistemas de corriente eléctrica (Altschuler, 1969).

El Término Clima espacial o “Space Weather” es el conjunto de fenómenos físicos y magnéticos derivados de la actividad solar y su interacción con el campo magnético terrestre o campo geomagnético.

El clima espacial puede influenciar en el rendimiento y la confiabilidad de los sistemas tecnológicos modernos y poner en riesgo la salud humana (Rozelot & Le-febvre, 2006).

Según la National Weather Service y el Space Weather Prediction Center estas mediciones en tiempo real (cercasas al tiempo real) se pueden dividir en tres categorías: sobre la superficie solar (ráfagas solares y EMC), en el medio interplanetario (eventos de radio, viento solar y centelleo interplanetario) y en la vecindad terrestre (campo magnético, condiciones del viento solar, ionosfera y partículas energéticas). A cada medición se le asocia un índice que mide el nivel de perturbación asociado a eventos solares eruptivos y así vez define la escala de intensidad. Recientemente en México este tema ha cobrado gran relevancia a través del Servicio de Clima Espacial en México (SCIEXMEX) desde el 2014.

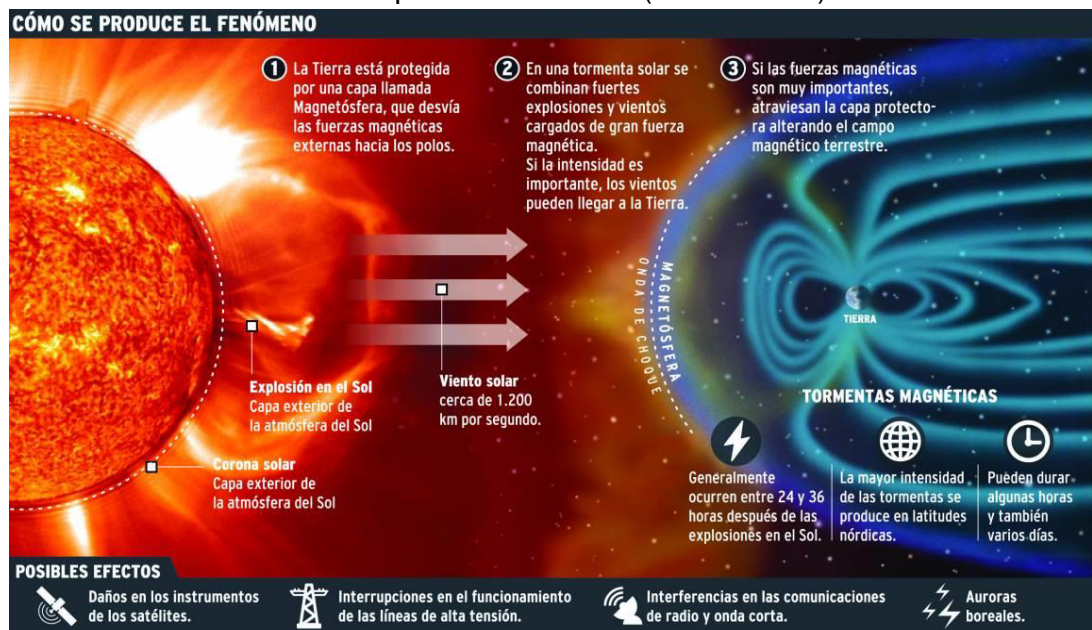


Figura 7: Contorno de una EMC antes de un choque interplanetario y el campo magnético que desvía el viento solar. Fuente: NASA.

Las principales causas de las perturbaciones en el entorno terrestre son las condiciones variables en el interior y en la atmosfera solar que se manifiesta en el medio interplanetario y el viento solar (Chian & Kamide, 2007) (Molvin, M.,2008).

1.2.1 El Ambiente Espacial Terrestre

El estudio del entorno solar-terrestre es antiguo y al mismo tiempo nuevo. Es antiguo en el sentido de que los primeros estudios de la influencia de la actividad solar, como las manchas solares sobre las perturbaciones magnéticas y las auroras en la superficie de la Tierra, contribuyeron al descubrimiento de las leyes electromagnéticas en los últimos siglos, de las que confiamos hoy. También cubre el tema de la relación entre el Sol y la atmósfera de la Tierra, y el posible efecto de la actividad solar en el clima que se conocía desde hace mucho tiempo. Por otro lado, el progreso de la investigación ambiental solar-terrestre se ha acelerado dramáticamente en los últimos años desde la disponibilidad de observaciones satelitales del espacio, en particular en el entorno cercano a la Tierra.

1.2.1.1 Medio Interplanetario Cercano a la Tierra

Los iones del Sol interactúan con el campo magnético de la Tierra y quedan atrapados, que rebotan entre los polos magnéticos Norte y Sur, formando el cinturón de radiación de Van Allen. Los iones suficientemente energéticos chocan con los átomos de la atmósfera superior de la Tierra cercano a los polos magnéticos, haciendo que estos se exciten o se ionicen. El resultado de la excitación o recombinación emiten fotones que producen el despliegue de luces en las altas latitudes del Norte y del Sur. Teniendo como resultado las auroras boreales y australes

El estudio del entorno solar-terrestre es antiguo y al mismo tiempo nuevo. Es antiguo en el sentido de que los primeros estudios de la influencia de la actividad solar, como las manchas solares sobre las perturbaciones magnéticas y las auroras en la superficie de la Tierra, contribuyeron al descubrimiento de las leyes electromagnéticas en los últimos siglos, de las que confiamos hoy. También cubre el tema de la relación entre el Sol y la atmósfera de la Tierra, y el posible efecto de la actividad solar en el clima que se conocía desde hace mucho tiempo. Por otro lado, el progreso de la investigación ambiental Solar-Terrestre se ha acelerado dramáticamente en los últimos años desde la disponibilidad de observaciones satelitales del espacio, en particular en el entorno cercano a la Tierra. El espacio no está vacío, el espacio que rodea a la Tierra, a los planetas y las estrellas son muy diferentes del ambiente que tenemos en la Tierra.

Las misiones en espaciales muestran las partículas cargadas y los campos geomagnéticos que circulan a través del espacio perturbando el campo geomagnético de la Tierra.

En la figura 8, se aprecia el comienzo del espacio cercano a la Tierra es aproximadamente 60 millas por encima de la capa de ozono, la ionosfera es una parte de la atmosfera de la Tierra donde la ionosfera se combina con las capas más altas de la atmosfera neutra superior, convirtiendo a esta región en un área de constante cambio bajo presión entre las condiciones de la Tierra y la des espacio. Estas capas del espacio cercano a la Tierra forman parte del dominio humano, pues en esta región es el hogar de los astronautas, también de las señales de radio utilizadas para guiar aviones, barcos y también a los satélites que proporcionan nuestras comunicaciones y sistemas de GPS.

En la figura siguiente muestra la ionosfera que es una región cargadas de partículas en el espacio cerco a la Tierra, que al estar en contacto con los gases de la atmósfera terrestre, forman eventos tales como las auroras.

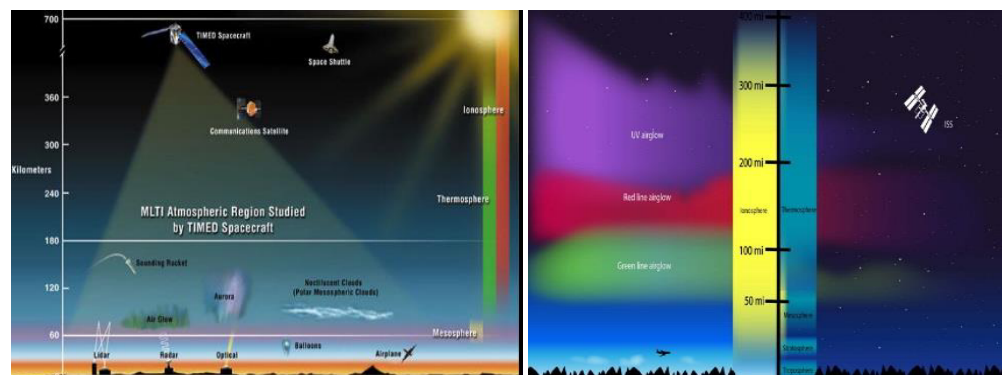


Figura 8: Región de partículas cargadas en el espacio cercano a la Tierra
Fuente: NASA's Goddard Space Flight Center/Duberstein.

Las partículas con cargas eléctricas provenientes del Sol (viento solar) logran interactuar con la magnetosfera de la Tierra.

En la aproximación de partículas, se puede ignorar la naturaleza supersónica del viento solar que rodea a la Tierra, así como su campo magnético de plasma.

Los fenómenos que ocurren en el sol y en la Tierra son independientes una de la otra.

La magnetosfera de nuestro planeta nos protege de las partículas cargadas expulsadas del Sol durante las tormentas solares. Sin embargo, algunas de estas partículas pueden influir a lo largo de las líneas de campo magnético de la Tierra hacia la atmósfera superior e inducir tormentas geomagnéticas. Uno de los efectos que se manifiestan en la tierra, debido a la actividad dinámica del Sol, son:

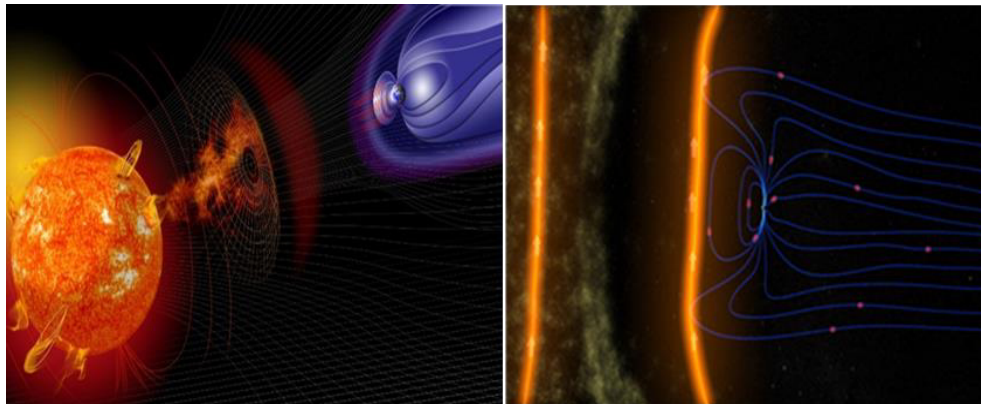
las auroras (boreales y australes). Cuando estas partículas entran a la atmósfera superior, colisionan y excitan átomos de oxígeno y nitrógeno, creando los colores brillantes que podemos ver a simple vista (M. Moldwin,2008).

De estas manifestaciones las tormentas geomagnéticas son las que causan mayores problemas a la Tierra. El encuentro entre plasmas magnéticas expulsadas por el Sol y el campo magnético terrestre desencadenando violentas fluctuaciones en los niveles del magnetismo Terrestre (Tormentas Geomagnéticas), que llegan a interrumpir y dañar a los sistemas de comunicación y a líneas de transmisión de energía eléctrica. Estas plasmas de energía producida por el sol logran penetrar el escudo geomagnético e inyectan sus partículas energéticas, produciendo una excitación de los sistemas de corriente eléctrica (Altschuler, 1969).

1.2.1.2 Campo Geomagnético

El campo magnético terrestre está sujeto a la llegada continua de flujo de plasma procedente del Sol, que se le conoce con el nombre del viento solar. La interacción entre este y el campo magnético de la Tierra da lugar a la aparición de una capa de corriente eléctrica. Conocida como magnetopausa, por debajo del cual el campo magnético terrestre ejerce una acción dominante. La región encerrada dentro de la magnetopausa recibe en nombre de magnetosfera.

La magnetosfera es una región alrededor de nuestro planeta Tierra en la que el campo magnético hace que se desvíe la mayor cantidad de partículas subatómicas provenientes del Sol formando así un escudo protector. El campo magnético de la Tierra puede ser afectado por la velocidad, densidad y el campo magnético del viento solar ver figura 9.



Figurara 9: Campo magnético de la Tierra que protege nuestro planeta de partículas solares. Fuente: NASA / GSFC / SVS

La magnetosfera de la Tierra es creada por nuestro campo magnético y nos protege de la mayoría de las partículas que emite el Sol. Cuando una CME o una corriente de alta velocidad llega a la Tierra, se zambulle en la magnetosfera. Si el campo magnético solar que llega dirigida hacia el sur e interactúa fuertemente con el campo magnético orientado de forma opuesta de la Tierra. Luego el campo magnético de la Tierra se abre lo que permite que las partículas energéticas del viento solar fluyan por las líneas del campo para golpear la atmósfera sobre los polos. En la superficie de la Tierra, una tormenta geomagnética se observa como una caída rápida en la intensidad del campo geomagnético de Tierra. Esta caída dura aproximadamente de 6 a 12 horas, luego de lo cual el campo magnético se recupera gradualmente durante un periodo de varios días.

1.2.1.3 Ionosfera Terrestre

Cuando estos fenómenos solares ocurren alrededor de la región centro ecuatorial del disco solar, la probabilidad de afectar la magnetosfera y la ionosfera es mayor. Generalmente cuando esto sucede, se forman las tormentas geomagnéticas y tormentas ionosféricas, estas pueden verse afectadas por eventos como las ráfagas solares, EMC y el viento solar rápido y lento interactuando una con la otra (Rodríguez M. et al., 2014).

Es una región cercana a la superficie de la Tierra. La ionosfera es una capa de gas parcialmente ionizado, es decir, una capa donde las partículas que la integran se encuentran cargadas eléctricamente (iones y electrones). Sin embargo, en su totalidad las partículas positivas que la componen igualan en cantidades a las negativas, por lo que en su conjunto el efecto total es neutro (Udias & Mezcuca, 1997).

En particular, la ionosfera es una capa atmosférica variante entre la Mesósfera y la Exosfera debido a los diferentes efectos de la rotación, traslación e inclinación de la Tierra y se forma por el resultado de la absorción de la radiación de luz ultravioleta proveniente del Sol.

En esta capa encontraremos que la colisión entre partículas es demasiado escasa para lograr recombinarse, formando así una población de plasma parcialmente ionizado (2×10^{-3}) (Delobea et al., 1971). Asimismo, durante este proceso están presentes corrientes eléctricas y campos electromagnéticos debido a la liberación de electrones libres perdidos por cada molécula o átomo. Además, este proceso es una interfaz entre la atmósfera terrestre y el espacio (Kelley M. C.,

2009). La dinámica de estos dos medios tan diferentes es necesario el análisis de su formación y perturbación.

La ionosfera representa menos de 1% de la masa de la atmósfera sobre los 100 km, es muy importante por su influencia en la transmisión de ondas de radio. La mayor parte de la ionosfera es neutral, pero cuando la radiación solar interactúa con la atmósfera, los electrones son desprendidos de los núcleos para formar el plasma ionosférico. La presencia de estas partículas cargadas hace a la atmósfera superior un conductor eléctrico, que soporta corrientes eléctricas (Anderson & Fuller-Rowell, 1999).

A bajas alturas, cerca de la superficie, hay poco iones y electrones debido a que la mayoría de la radiación ionizante ha sido absorbida. De este modo, en un nivel intermedio existe un máximo definido de la densidad. La densidad electrónica y la temperatura promedio en la ionosfera es de 10^5 cm^{-3} y de 10^3 K . Y la densidad del campo magnético es del orden de 10^4 nT (Kono, 2009).

Es por ello, la ionización de esta capa presenta un ciclo de día-noche, puesto que estará más ionizado cuando recibe la luz solar,

En la figura 10, muestra la atmósfera neutra y su división de capas dependiendo del aumento de temperatura sobre la Tierra.

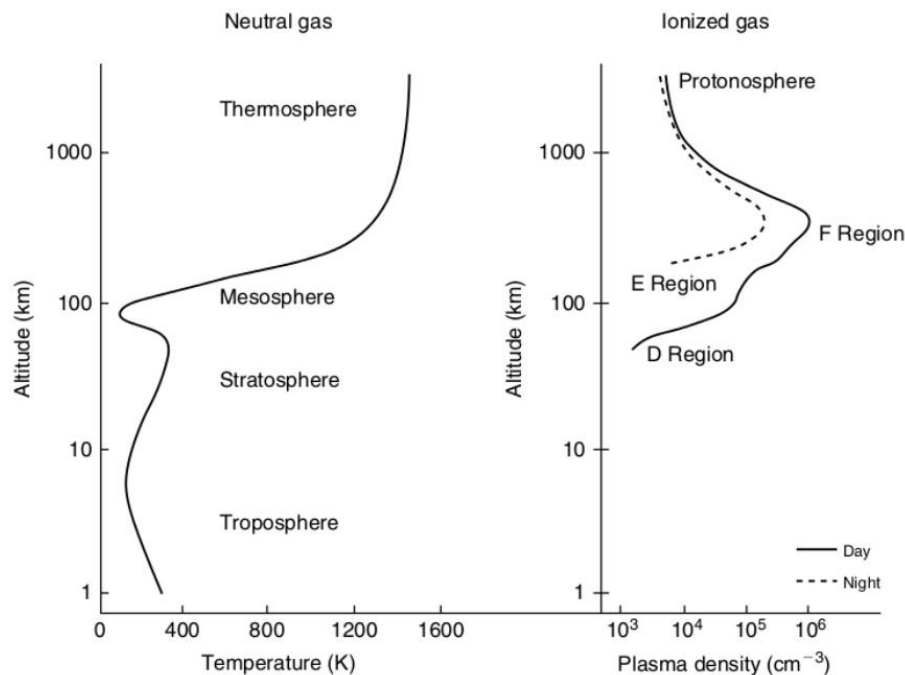


Figura 10: La atmósfera neutra y su división de capas. Derecha: muestra el contorno de la densidad eléctrica de un gas ionizado tanto para el día como noche. Izquierda: la atmósfera neutra y su variabilidad térmica. Tomado de: (Kelley M.C., 2009)

Estructura de la Ionosfera

La ionosfera está formada por la ionización de gases atmosféricos, principalmente N_2 , O_2 y O . En la parte del espectro solar responsable de esta ionización en los distintos rangos de altura. En bajas y medias latitudes la energía requerida proviene fundamentalmente de la radiación solar en el extremo ultravioleta (EUV) y parte de rayos-X. Se divide principalmente en tres capas principales ionizadas a distintas alturas las cuales son (D, E, F) según el grado de ionización.

- Capa D: Se ubica entre los 50 -80 Km de la ionosfera. Tiene una ionización muy baja que se genera principalmente por las radiaciones solares, por lo que durante la noche desaparece (Merril et al., 1996).
- Capa E: desde los 80-140 Km. En el día sufre grandes variaciones por la ionización. Por la noche la capa E logra permanecer, debido a que la principal fuente de ionización. La máxima ionización ocurre al medio día en los meses de verano (Merril et al., 1996). Esta región también es conocida como la capa de Kennelly.
- Capa F: Conocida como la capa Appleton, es la capa superior de la ionosfera terrestre. La capa F sufre una deformación en su perfil de densidad durante el día dando origen a las capas F1 y F2. La primera se localiza a una altura comprendida entre 140 y 200 Km, presentando componentes ionizados de N_2 y O , la segunda región F2, se presenta a latitudes que van desde los 200 hasta los 500Km, en donde su componente principal de ionización es el Oxígeno atómico. La capa F₂ sigue siendo durante el día o la noche la capa responsable de la transmisión de ondas de alta frecuencia, facilitando las comunicaciones de radio de larga distancia (Hunsucker, 1991).

1.3 Tormentas Geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, que puede durar varias horas e incluso días. Su origen es externo y se producen por el aumento brusco de partículas emitidas por las erupciones solares que perturba la magnetosfera, produciendo alteraciones en el campo magnético terrestre.

La agencia estadounidense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) estima que un ciclo solar de 11 años puede haber cuatro tormentas geomagnéticas extremas, 100 severas y 200 fuertes, lo que indica que se trata de un fenómeno natural frecuente.

La primera señal de la importancia de las tormentas geomagnéticas muy intensa se produjo los días 1 y 2 de septiembre de 1859, cuando tuvo lugar una gigantesca erupción solar que origino la tormenta geomagnética más importante registrada hasta nuestros días. Este suceso se reconoce como “evento de Carrington” en honor del astrónomo ingles que observo la fulguración solar y la relaciono con la tormenta magnética registrada en la Tierra.

Las tormentas geomagnéticas están relacionadas con la variación temporal de la magnetosfera terrestre por el moviendo del Sol. Estas son provocadas por la transferencia de energía entre la presión de una onda de choque del viento solar y la compresor del campo magnético. Ambas interacciones causan un aumento en el movimiento del plasma a través de la magnetosfera y un aumento de la corriente eléctrica en la magnetosfera y la ionosfera (Tsurutani et al., 2003).

En la magnetosfera existen partículas cargadas de origen interplanetario y de origen ionósferico que se distribuye en función de la densidad y energía. Debido a la existencia de un plasma en movimiento en presencia de un campo magnético se crea un conjunto de corrientes magnetosferas. En la que destaca el anillo de corriente formada por iones y electrones de origen ionósferico y del viento solar que son transportadas hasta la parte inferior de la magnetosfera.

Las propiedades definitorias de una tormenta geomagnética es el incremento del anillo de corriente, localizado entre 2 y 7 Radios terrestres (Gonzales et al., 1994). Las erupciones intensas se asocian con eventos de partículas energéticas solares que pueden llegar a la Tierra y ser responsables de eventos geofísicos.

La aparición de CME depende del ciclo solar aumentando la actividad solar. Las CME son estadísticamente más propensas a provocar alteraciones geomagnéticas cuando sus fuentes solares se encuentran cerca del meridiano central y se observa como CME de halo rápido con un ancho cercano a 360 grados (Zhang et al., 2007; Gopalswamy et al., 2010).

Las Eyecciones de Masa Coronal (CME) se describen como eventos que conducen a tormentas geomagnéticas. El vínculo entre las CME, las intensidades de una tormenta geomagnética y la aparición de una tormenta repentina es el aumento repentino de intensidad del campo magnético de la Tierra, debido a la imposición de choque en la magnetopausa. Estos choques con frecuencia conducen a tormentas geomagnéticas que se caracteriza por el acoplamiento de anergia del viento solar y la magnetosfera y el crecimiento de la corriente del anillo (Saiz et al., 2013).

1.3.1.1 Faces de Efectos de las Tormentas Geomagnéticas

En las tormentas geomagnéticas podemos observar sus tres fases. Pues se observa la razón principal de una tormenta geomagnética intensa, es debido a un intenso campo magnético interplanetario en dirección Bz sur y de larga duración, lo cual permite una mayor transferencia de energía efectiva entre el viento solar y la magnetosfera a través de la reconexión magnética en las regiones cercanas al choque (Echer et al., 2008).

Durante la primera fase da inicio de un incremento en la presión dinámica debido al paso de un choque interplanetario. La segunda fase es la principal, debido a que muestra la prolongación del campo interplanetario en dirección sur a lo cual puede estar en la eyecta. Las dos fases anteriores finalizan con la tercera fase que es la de recuperación a condiciones normales.

En la figura 11. Se puede observar la fase inicial, principal y final durante de la tormenta geomagnética ocurrida en Septiembre del 2017.

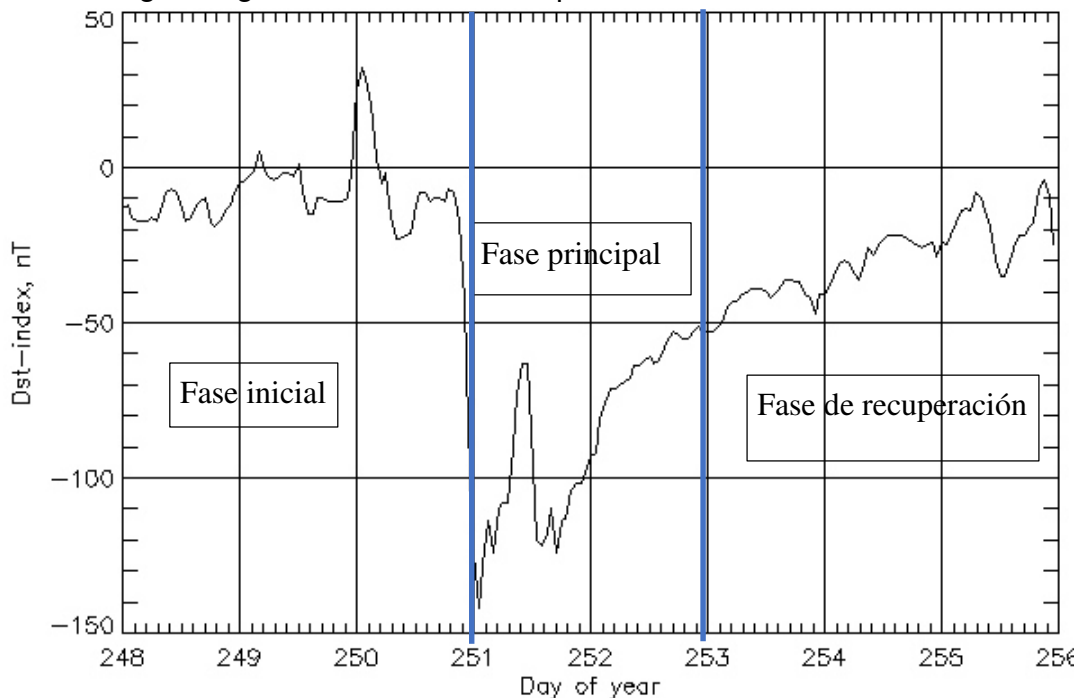


Figura 11: Fases de la tormenta geomagnética de septiembre del 2017. Tomada de: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>.

1.3.1.2 Efectos de las Tormentas Geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son producto de las partículas energéticas provenientes del Sol, que pueden dañar o destruir no solo a los satélites que se encuentran orbitando alrededor de la Tierra.

Son muchos los acontecimientos que han quedado en los registros históricos que ponen en manifiesto los efectos que producen los eventos de emisiones de masa solar dirigidos a la Tierra. Esto pone en manifiesto la vulnerabilidad de nuestros sistemas tecnológicos terrestres.

Entre los principales sistemas tecnológicos con base en la Tierra son afectados seriamente por el clima espacial, tal como las redes eléctricas de alta tensión, los gaseoductos y oleoductos, los cables de telecomunicación a larga distancia e incluso el sistema de señalización ferroviario. Los primeros están relacionados directamente con la interferencia directa sobre el campo geomagnético, los cuatro últimos están relacionados con los efectos que producen las corrientes inducidas en material conductor.

Los sistemas de comunicaciones y navegación también pueden verse seriamente afectados por los cambios imprevistos de densidad de partículas cargadas de la ionosfera, que modifican la fase y amplitud de las ondas electromagnéticas. Esto origina fluctuaciones de la intensidad de la señal, distorsión y pérdida gradual de potencia, lo que hace que en casos extremos se pierda la comunicación con el satélite.

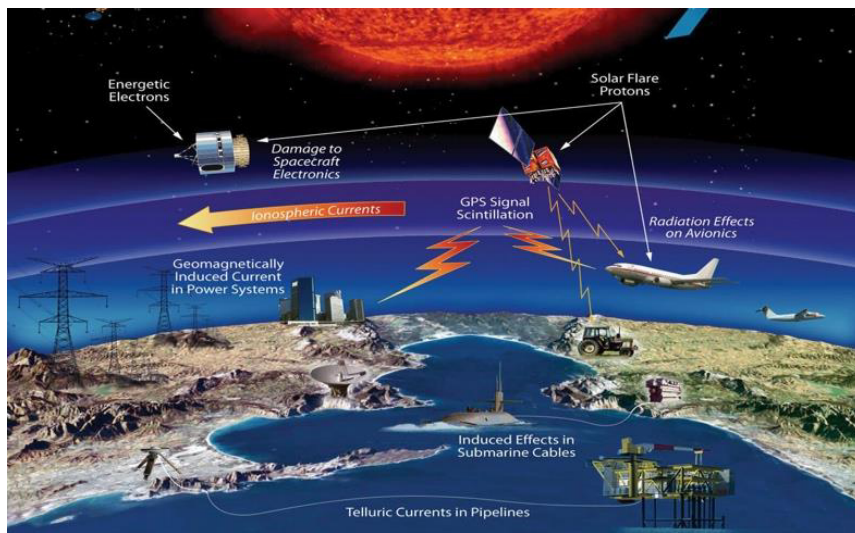


Figura 12: Tecnología e infraestructura afectadas por eventos climáticos espaciales Créditos: NASA

Asimismo está pérdida de señal causa errores en el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS) o sistemas de navegación terrestre por ondas de radio. Cuando ocurre una tormenta geomagnética algunas partículas

de alta energía provenientes del Sol que logran penetrar la magnetosfera terrestre, interacciones con las componentes de la ionosfera provocando perturbaciones y variaciones en la densidad electrónica.

En la figura 12, muestra los efectos que puede ocasionar las tormentas solares. Este efecto de la ionosfera tiene como consecuencia que los satélites reciban la señal con diferentes retardos, estimando una posición con cierto rango de error que resulta de suma importancia para los sistemas de navegación, aviación, de interés científico, en donde se requiere de mediciones de alta precisión.

Las partículas de alta energía son arrastradas por las Eyecciones de Masa Coronal y logran penetrar la magnetosfera pueden dañar a los satélites de comunicación ya que la mayoría de estos se encuentran orbitando dentro de la coraza magnética. Estos daños pueden ocurrir cuando algunas de las partículas penetren el campo del satélite, o indirectamente cuando el flujo de partículas induce campos en su estructura provocando descargas.

Los efectos del clima espacial dependen fundamentalmente del Sol, ya que es una fuente de radiación de ondas electromagnéticas y partículas atómicas.

Nuestra sociedad depende cada vez más de las tecnologías basadas en satélites (radio fusión TV, teléfonos celulares, GPS, internet, activos de seguridad comercial/militar/ nacional) susceptibles a condiciones nocivas en el espacio, es decir, "clima espacial"(Baker & Lanzerotti,2016).

Las tormentas geomagnéticas intensas pueden dañar o destruir no solo los satélites que se encuentran orbitando la Tierra, sino también a los astronautas durante las misiones largas sobre la Luna o Marte o simplemente en la estación espacial. En el pasado han ocurrido estos fenómenos que han impactado de gran manera a la Tierra ya que en aquella época la línea de telégrafos colapso y también ha dejado sin energía eléctrica a ciudades del hemisferio norte (Quebec, Canadá 1989). En la actualidad se ha observado que la confiabilidad y la precisión de los instrumentos de comunicación y navegación GPS puede verse afectada en gran dimensión por estos tipos de eventos (Moldwin,M.,2008).

Por lo tanto, el pronóstico de eventos meteorológicos espaciales severos sería muy valioso para permitir que los centro de comunicación se preparen con anticipación y tomen medidas de protección ante tal evento (Horne et al., 2013; Cannon,2013).

1.3.1.3 Perturbaciones en la Ionosferas y TEC

Las perturbaciones ionosfericas muestran gran variabilidad temporal. Estas perturbaciones se deben al acoplamiento de la ionosfera con las regiones que componen el sistema Sol-Tierra. Estas variaciones se clasifican dependiendo no solo por las actividades propias del Sol sino también de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra. De esta manera las perturbaciones de la ionosfera se dividen en dos grupos perturbaciones irregulares e irregulares.

Las perturbaciones regulares, son aquellas que se repiten periódicamente y, por lo tanto, pueden ser predichas. Estas perturbaciones son las que definen el comportamiento en la ionosfera en los días tranquilos (días sin variación regular).

- Variación diurna: dado a la variación de la intensidad de la radiación solar a lo largo del día. Esta variación existe los 365 días del año y se debe a la rotación de la Tierra en su propio eje. Se produce por el efecto combinado de los sistemas de corrientes ionosfericas que influyen en la capa E y la corriente inducida que fluye en la superficie terrestre.
- Variación estacional: esta perturbación depende de la rotación de la Tierra alrededor del Sol. El cual tiene una duración de aproximadamente 27 días. Los ángulos mayores del Sol se ven reflejados con una mayor densidad de ionización en las capas D, E y F1. Sin embargo, la capa F2 no sigue un patrón, su ionización es mayor en invierno y menor en verano (Zou et al.,2000).
- Variación con el ciclo Solar (11 años): a medida que el ciclo solar se acerca a sus valores máximos la variación de densidad ionosférica aumenta en todas las capas, en tanto para los valores de baja actividad solar la densidad disminuye. Esto provoca que la radiación solar cambie a lo largo del ciclo solar, lo que incita cambios en el nivel de ionización de la ionosfera.

Perturbaciones irregulares, se caracterizan por ocurrir de forma inesperada y pueden llegar a producir grandes cambios en la ionosfera. El origen principal de este comportamiento anormal del Sol y por lo tanto es imposible conocer cuando se presentara.

- Esporádica E: Inicia en la región E de la ionosfera en circunstancias de ionización fuerte, situado aproximadamente a 110 km de altura, se le asocia

con fenómenos como meteoritos, tormentas, también como actividad solares y geomagnéticas. La E puede ocurrir durante el día y la noche variando latitudinalmente.

- Perturbaciones ionosféricas súbitas (SID): Son ocasionadas por las ráfagas solares incrementado la ionización súbitamente en la región D. cuando absorción de frecuencias, medias que pueden llegar a durar desde minutos hasta horas. estas perturbaciones son mas comunes en regiones ecuatoriales.
- Tormentas Ionosféricas: Las tormentas ionosfericas son variaciones de la densidad electrónica y están relacionadas con los eventos de EMC que comprimen a la magnetosfera. Son de mayor duración que las SID y afecta principalmente a la región F2 en eventos demasiados energéticos pueden afectar a regiones más bajas.

En la figura 13, muestra los cambios mayores de la ionosfera se producen a latitudes medias. El efecto sobre el TEC de las tormentas geomagnéticas en latitudes medias por lo general depende de la estación del año. Ya que en verano se produce una fase positiva corta seguida de una larga fase negativa, en tanto que en invierno se observa una larga fase positiva esta fase tiene una fuerte dependencia en el momento que ocurre el máximo de la perturbación geomagnéticas (Prolls,2008).

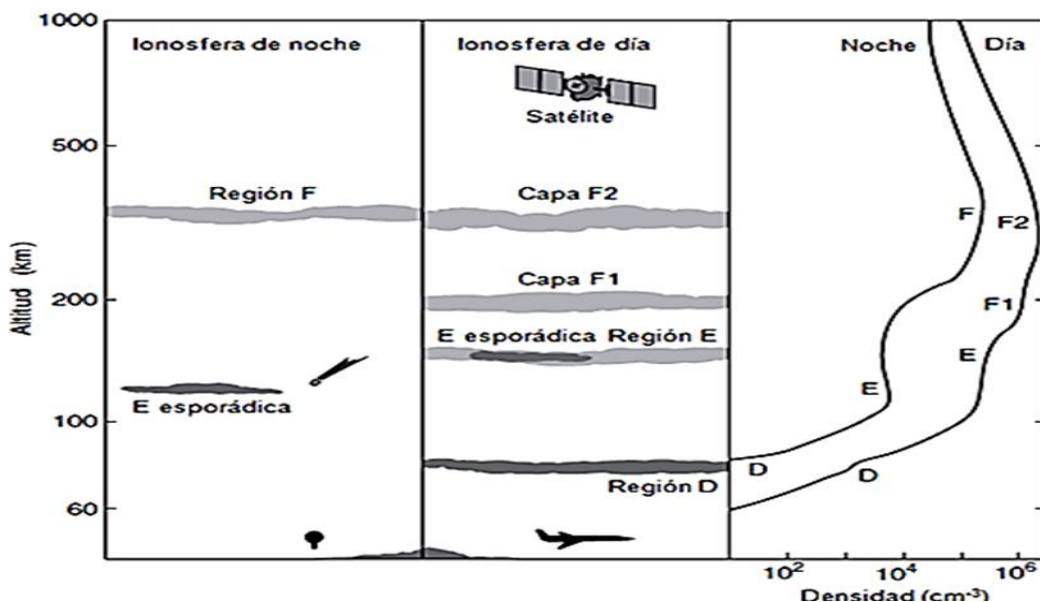


Figura 13: Estructura vertical de la ionosfera terrestre Moldwin, 2008.

El Contenido Total de Electrones en la ionosfera (TEC) se define mediante la ecuación siguiente.

$$TEC = \int_S^R Ndl \dots\dots\dots (1)$$

Como el número total de electrones integrado a lo largo de la ruta desde el Satélite hasta el receptor GNSS en la superficie terrestre. El TEC es un indicador de variabilidad ionosférica derivada de la señal provenientes de estaciones fijas de GPS modificada por los electrones libres en la ionosfera.

El rango nominal es de 10^{16} a 10^{19} electrones/ m^2 , donde mínimo y máximos se producen en la media noche y media tarde. Por la noche el TEC disminuye muy lentamente debido a la recombinación de los electrones y de los iones dispersos. Las variaciones diurnas del TEC se caracterizan con un aumento en el transcurso que viaja del Norte a Sur siendo que la luz Solar es más directa.

La nomenclatura de las variables son las siguientes R es la ubicación del receptor, S es la ubicación del satélite situado por encima de la ionosfera, N es la densidad electrónica local media y la integración es a lo largo de la trayectoria de la señal desde el satélite hasta el receptor.

1.4 Índices de Actividad Geomagnéticos

Los índices geomagnéticos permiten cuantificar las variaciones del campo geomagnético causadas por las corrientes interacción o alguna de sus componentes, en lugares determinados o a escala planetaria. La gran variedad de índices han sido usados en distintos momentos con diferentes propósitos, que se presentan en la magnetosfera, ionosfera y las profundidades de la tierra.

De modo, que el tamaño de las tormentas geomagnéticas es posible medirlo mediante distintos índices geomagnéticos, sin embargo nosotros solo nos enfocaremos en: Índice Dst (Disturbance Storm Time), Índice Kp, Índice Kmex, Índice dh_mex.

1.4.1.1 Índice Dst

El índice Dst se encarga de medir perturbaciones geomagnéticas y monitorear el nivel de la tormenta geomagnética alrededor del mundo y proporcionado por el World Data Center for Geomagnetic en Kioto(Nose, 2015). se puede estimar la severidad de una tormenta magnética. Las perturbaciones geomagnéticas en la superficie terrestre se registran mediante magnetómetros colocados en la Tierra. Actualmente son cuatro los observatorios geomagnéticos de bajas latitudes como se muestra en la figura 114.

Los cambios en la densidad ionosférica son obtenidos por observatorios muy cercanos a la zona ecuatorial que miden la intensidad de la corriente eléctrica concentrada en el anillo de corriente y describen el comportamiento de la magnetosfera. Sus unidades son los nanos teslas (nT).

Un Dst positivo representa la compresión sobre la magnetosfera, en tanto que los valores al rededor del cero representan una magnetosfera tranquila. Por consiguiente un Dst negativo delataría la ocurrencia de una perturbación ionosférica, por lo que puede durar de unas pocas horas hasta días. Durante esta etapa pueden generarse segundas caídas, aun cuando la magnetosfera no se ha logrado recuperarse completamente.

El valor Dst, es estadísticamente cero en los días considerados tranquilos por los organismos internacionales (Servicio Internacional de Índices Geomagnéticos (ISGI)). Durante una tormenta geomagnética su valor desciende en unas horas desde cero hasta su valor mínimo y comienza a recuperarse lentamente hasta alcanzar el valor inicial próximo a cero. A medida a que el índice Dst es más negativo, más intensa es la tormenta magnética.

Existen precedentes de tormentas geomagnéticas muy intensas que se produjo durante los días 1 y 2 de septiembre de 1859 este evento se le conoce como “evento Carrington” por el astrónomo británico Richard Carrington que, al canso un índice Dst de -860nT, 13 y 14 de marzo de 1989 hubo otro evento que se le conoce como “evento de Quebec” debido a una tormenta geomagnética muy intensa con un índice Dst de -649nT que provoco que millones de personas se quedaran sin energía eléctrica durante más de 9 horas , y alguno satélites fallaron y modificaron sus orbitas, otro evento destacable fue la “tormenta de Halloween” que ocurrió en Octubre del 2013 con un Dst de -383nT, provocando apagones en varias zonas del sur de Suecia y África.

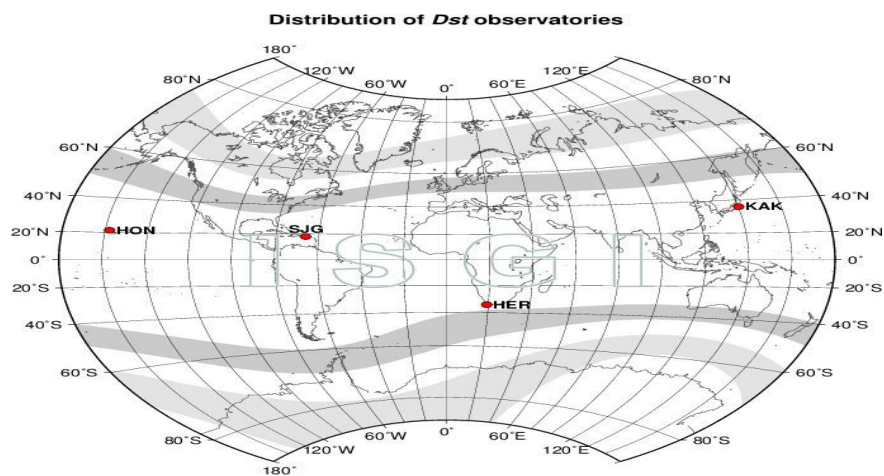


Figura 14 Distribución de los observatorios del Dst. Fuente de: ISGI- Servicio Internacional de Índices Geomagnéticos, 2017.

La clasificación de las tormentas geomagnéticas Dst, para Gonzales et., (1994) se muestra en la siguiente tabla 3:

Categoría	Valor Dst (nT)
Débiles	$-30 \geq Dst \leq -50$
Moderadas	$-50 \geq Dst \leq -100$
Intensas	$-100 \geq Dst \leq -250$
Severas	$-250 \geq Dst \leq -500$

Tabla 3: Clasificación de Tormentas Geomagnéticas en función de Dst.

1.4.1.2 Índice Kp

También conocido como índice planetario, es él se creó con el propósito de determinar la intensidad de la actividad geomagnética en una escala planetaria para intervalos de 3 horas. Se obtiene a partir del valor medio de los índice K normalizados de 11 observatorios del norte y 2 observatorios al sur situados entre los 44° y 60° principalmente al norte de América y Europa. En la figura 15, se muestra la distribución de los observatorios magnéticos Kp, distribuidos en la Tierra.

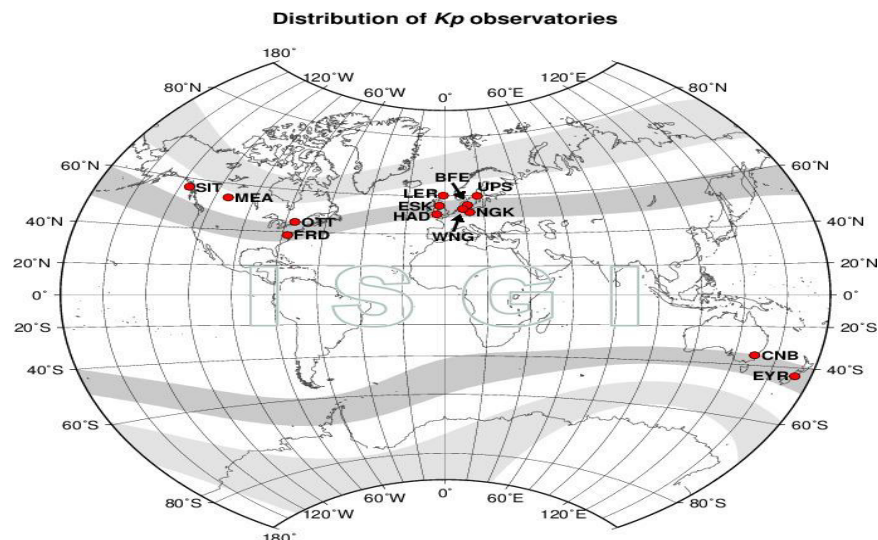


Figura 15: Distribución de los observatorios del índice Kp. Fuente: ISGI- Servicio Internacional de índices Geomagnéticos, 2017.

Es un índice trihorario que indica el nivel de actividad magnética se obtiene comparando un rango de tres horas de actividad magnética con la curva de un día

quieto en un observatorio específico y es un índice cuasi-logarítmico. Con el objetivo de describir la variación en el campo magnético terrestre provocada por la interacción del viento solar, magnetosfera y la ionosfera entre sí. El valor que puede tomar este índice que va de 0 a 9, permitiendo evaluar de forma cuantitativa una perturbación magnética vinculada a la emisión corpuscular del sol, donde un valor cercano a 9 nos indica un alto grado de penetración de radiación. Este índice es una referencia de la NOAA en las escalas del clima espacial, que describen el comportamiento de perturbaciones en la magnetosfera, por ejemplo de las tormentas geomagnéticas, las cuales se clasifican por la Escala de la NOAA en función del valor del índice Kp, que se representa en cinco niveles con la letra G en la tabla 4, muestra la clasificación de las tormentas de acuerdo a la NOAA, indica tormenta geomagnética menor, 6 moderada, 7 fuerte, 8 y 9, severa y Extrema.

Descripción	Escala de Tormentas NOAA	Valor del índice Kp
No hay tormenta	G 0	1-4
Menor	G1	5
Moderada	G2	6
Fuerte	G3	7
Severa	G4	8
Extrema	G 5	9

Tabla 4: Clasificación de las Tormentas Geomagnéticas en función del índice Kp. Tomado de: (NOAA Space Weather Scales, 2017).

1.4.1.3 Índices Regionales Mexicanos

Recientemente el Laboratorio Nacional de Meteorología Espacial (LANCE) y el Servicio Magnético (MS), ambas instituciones de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se dieron la tarea de impulsar el cálculo del índice K para México. Considerando que el Servicio Magnético proporciona los datos del campo magnético terrestre y el Laboratorio Nacional de Meteorología Espacial proporciona la infraestructura para el cálculo del índice Kmex. Cabe mencionar que el índice regional mexicano es un producto experimental en proceso de validación por LANCE, en colaboración del Servicio Magnético.

Los datos magnéticos se miden en el Observatorio Geomagnético Teoloyucan (TGO), que está ubicado en el centro de México (LAT 19.746 °, LON -99.190 °). El observatorio geomagnético funciona con un varío grafo fluxante de 3 componentes DFI, un magnetómetro Overhauser POS N 129 y un DI- flux ZEISS

THEO20B, con un vario grafo de respaldo FGE HDZ. El servicio Magnético informa los datos casi en tiempo real con una cadencia de un minuto y una resolución de 1 nT. Para el cálculo del índice Kmex el Servicio Magnético proporciona un archivo por día en formato Extended IAGA2002 de ese formato se extraen los datos para los cálculos (Corona Romero et al., 2017).

A continuación, se describen los parámetros para la obtención del índice regional Kmex.

Para la eliminación de las variaciones cíclicas en la componente horizontal (H) del campo geomagnético el primer paso que se realiza es calcular el valor medio de $H(\langle H_0 \rangle)$ a lo largo de los 27 días, durante un tiempo dado $t=t_0$. La selección es de un periodo de 27 días ya que es la duración de una rotación Solar, por lo tanto este periodo es suficientemente largo para tener en cuenta los efectos cíclicos solares y terrestres de H.

Esto permite definir las variaciones de H (dH) por un tiempo dado t_0 como:

$$dH(t_0) = H(t_0) - \langle H_0 \rangle \quad (2)$$

Una vez conocido el valor de $dH(t)$, el próximo paso es calcular los valor máximo (MH) y el mínimo (mH) en lapso de 3 horas. Con MH y mH conocidos, procedemos a calcular la variación máxima de tres horas de dH (DH):

$$DH = | MH - mH |. \quad (3)$$

Calculamos ocho valores diferentes de DH por día mediante la ecuación (2). Luego usamos DH para calcular el Kmex.

- Índice Kmex

Valores en casi tiempo -real del índice Kmex calculado a partir de los datos del observatorio magnético de Teoloyucan (región central de México) (SCIEMEX, 2018).

- Variaciones en la componente horizontal (ΔH)

Valores en casi tiempo real del índice ΔH calculado a partir de los datos del observatorio magnético de Teoloyucan (región central de la ciudad de México) (SCIEMEX, 2018).

1.5 Motivación de esta tesis

Las estructuras de gran escala pueden causar el inicio de las tormentas geomagnéticas. Las tormentas geomagnéticas tienen una estrecha relación con las perturbaciones ionosféricas. Aunque a grandes latitudes esta relación ha sido más estudiado, que a latitudes medias como en el territorio mexicano y sus efectos en el territorio. La motivación de este trabajo es analizar sobre las perturbaciones y sus efectos en la ionosfera y como afecta a los sistemas tecnológicos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivos generales

Identificar los eventos que provocaron las tormentas geomagnéticas y sus efectos en México en los años 2015-2017.

1.6.2 Objetivos específicos

Reportar las tormentas geomagnéticas usando el índice regional Kmex, durante la fase descendente del ciclo Solar 24.

Determinar en qué condiciones se produjo y cuanto perdura el crecimiento de la variación de la intensidad del campo magnético durante la fase principal de una tormenta geomagnética.

Encontrar una relación entre las tormentas geomagnéticas intensas utilizando los índices Dst, Kp, Kmex y Delta H, para conocer las afectaciones sobre el territorio mexicano.

Analizar las componentes del viento Solar y el TEC sobre México para los eventos de los años 2015-2017 en los cuales el índice Kp alcanzó valores iguales o mayores a 5

2 MATERIALES Y METODOS

En la realización de esta tesis se han analizado observaciones realizadas por *in situ* por instrumentos a bordo de sondas espaciales que miden las propiedades del plasma y del campo magnético interplanetario.

Los instrumentos *in situ* incluyen magnetómetros y analizadores electrostáticos de plasma que proveen información sobre el estado de plasma interplanetario.

En esta tesis se seleccionaron eventos que ocurrieron durante los años 2015, 2016 y 2017. Los datos fueron descargados del Centro WDC de Kyoto; y los de Kp, del servicio ISGI. La densidad de viento solar (n), la velocidad de flujo (v), y la magnitud de campo interplanetario (B), así como sus tres componentes (B_x , B_y , B_z), provienen de la base de datos OMNIWeb, del centro Goddard Space Flight Center.

2.1 Datos in-situ del Viento Solar

Los datos del viento solar están disponibles, de la base de datos OMNIWEB de la NASA (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/form/dx1.html>), registrada por varios satélites en las inmediaciones de la Tierra, estas observaciones interplanetarias permiten estudiar las características de las tormentas geomagnéticas y la actividad solar.

Estos son algunos de los satélites que se encuentran en las inmediaciones Sol-Tierra y proporcionan datos en el repositorio OMNIWEB en las se obtuvieron para este estudio.

En 1997 el satélite ACE (El Explorador de Composición Avanzada) fue diseñado con el objetivo de medir propiedades del viento solar entrante y también para dar a los científicos avisos avanzados tanto de las intensas erupciones solares como de las CME. El satélite WIND (Viento) fue lanzado el 1 de Noviembre de 1994, con el objetivo de caracterizar el flujo constante de las partículas del Sol.

Los efectos del Sol y del Medio Interplanetario se derivan múltiples fenómenos que se registran en la atmósfera o campo magnético Terrestre. Siendo de particular interés las tormentas ionosféricas y geomagnéticas, estos fenómenos se registran a través de naves espaciales que se encuentran fuera de nuestra atmósfera, que miden y observan los incrementos de las partículas energéticas de radiación, que a su vez afecta al campo geomagnético terrestre. La visión general se basa en observaciones de Ulyses, SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) y otras misiones espaciales que han mejorado el conocimiento científico en física solar y heliofísica y la conexión de Sol-Tierra. Las nuevas mediciones de las partículas in situ, parámetros de plasma y campo magnético y observaciones

ópticas (EUV, rayos X, luz blanca) han llevado a una nueva comprensión de los principales fenómenos que controlan el clima espacial.

El progreso continuo a través de la misión STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) de la NASA, que aporta grandes avances entorno al Sol y el clima espacial ya que predice las actividades meteorológicas en tiempo real.

Las mediciones in situ del viento solar, mediante satélites que salieron de la magnetosfera de la Tierra durante parte de sus órbitas, han proporcionado evidencia directa de que este flujo de plasma no es homogéneo, pero puede cambiar rápidamente de una brisa suave a un huracán. Las perturbaciones del viento solar se han identificado como fuertes y con riesgos como, fallas de satélites, cortes de energía y problemas de telecomunicaciones. Durante los inicios de poderosas erupciones solares, las partículas pueden acelerarse hasta cientos de MeV o incluso a energías GeV que representan un peligro grave para los astronautas.

Los electrones de energía de KeV pueden enterrarse en los sistemas electrónicos de las naves espaciales, produciendo eventos de descarga dieléctrica profunda que pueden inducir a pérdidas completas de dispositivos e incluso de naves espaciales.

2.2 Datos de Índices de Actividad Geomagnética

Además, el viento solar y el flujo de partículas energéticas considerablemente más altas (100 MeV/n) penetran continuamente en la heliosfera desde el medio interestelar. Estas partículas tienen mucho menos intensidad, pero debido a su alta energía, puede causar daños electrónicos en los sistemas satelitales.

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, los datos de esta índice se encuentran en línea mediante la página Web, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html.

Los eventos protónicos y EMC reportadas en el sitio Web de la NOAA <https://www.spaceweatherlive.com>, de acuerdo al tiempo de detección y localización de ambos fenómenos.

Las CME, fueron detectadas por el cronógrafo LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) a bordo del satélite SOHO (Solar Heliospheric Observatory). Sus parámetros como ancho, posición. La velocidad y aceleración, se tomaron del catálogo LASCO CME, de la NASA listado en el sitio Web <http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME-List>.

Las componentes del campo magnético interplanetario y los datos del viento solar fueron obtenidos de la NASA's , en donde se tiene acceso a los datos del viento solar obtenidos por el satélites ACE, Wind y GOES. Se consultaron los datos del

campo magnético interplanetario, la velocidad, densidad y temperatura del viento solar, así mismo como los índices Kp y Dst se emplearon para diferenciar los periodos de escasa o demasiada perturbación en la magnetosfera. Los datos que se utilizan para identificar y analizar estos fenómenos, las medidas de campo magnético y el plasma del viento solar. El índice Dst se utiliza tradicionalmente para establecer el grado de perdurabilidad del campo geomagnético.

También se extrajeron imágenes del catálogo de CACTus mediante la página web, <http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php> donde observaciones de LASCO C2/ C3 detecta el a través de imágenes de cronógrafo, donde se calcula la velocidad inicial de cada evento.

2.3 Datos de TEC

Para conocer el grado de perturbación en la ionosfera se necesita calcular el Contenido Total de Electrones (TEC). Cuando todas estas señales electromagnéticas viajan a través de la ionosfera, la cual es un medio de dispersión donde la refracción de las ondas depende de la frecuencia de estas.

El TEC, es un parámetro que se utiliza para estudiar el estado de la ionosfera de la Tierra.

2.4 Criterios de Análisis de Casos de Estudio

Para la selección de datos se logra a través del satélite espaciales ACE, el Experimento de Campo Magnético (MAG) proporciona mediciones continuas del campo magnético local en el medio interplanetario y el siguiente es el Experimento del viento solar Electrón Protón Alfa Monitor (Solar Wind Electron Protón Alfa, SWEAPAM), mide el electrón del plasma solar del viento y los flujos de iones (tasa de flujo de partículas). Estos datos proporcionan un conocimiento detallado de las condiciones del viento solar, además de proporciona mediciones del viento solar en tiempo real. Estos experimentos permiten el monitoreo de las características del campo magnético interplanetario (IMF), en particular la componente ortogonal al plano de la eclíptica (B_z), la magnitud del campo magnético, la velocidad y densidad del plasma solar que son parámetros principales que controlan el acoplamiento de la magnetosfera. Cabe mencionar que la velocidad del plasma también es un parámetro importante que nos permite examinar la propagación de la perturbación causada por las CME en el viento solar. Para estudiar más específicamente la geoeffectividad de los diferentes eventos solares que inciden en la Tierra, usamos el servicio OMNIWeb (omniweb.gsfc.nasa.gov/), que reconstruye las propiedades del viento solar en el arco de choque de la Tierra de ACE datos y otras naves espaciales.

Además en esta selección de datos se tomó en cuenta qué fue lo que ocasionó cada evento y las afectaciones que ocasionaron en el territorio mexicano.

Así mismo se incluye un análisis del comportamiento de la ionosfera en donde se incluyen graficas de los valores del TEC para distinguir su respuesta ante las perturbaciones geomagnéticas.

La selección de eventos de la fase descendente del ciclo solar 24, acompañados de ráfagas solares con intensidades de B a X en (rayos X). En la tabla 5 se en listan

En la tabla 5, muestra los siete eventos y las características principales como el inicio del evento, localización e intensidad.

Fecha de eventos	Inicio	Máximo	Fin	Localización	Intensidad
20150317	22:49	23:34	23:48	N10W54	C9.1
20150622	17:39	18:23	18:51	N13E27	M6.6
20151004	02:34	02:41	02:48	S20W89	M1.0
	16:13	16:18	16:30		B7.2
20151219	21:49	22:28	23:08		C4.5
20160306	04:58	05:12	05:19	N11W16	B7.2 G2
20161013	20:40	21:05	21:21		C1.3
20170906	11:53	12:02	12:10	S10W30	X9.3

Tabla 5: Inicio y fin de los eventos seleccionados. Tomado de: <https://www.spaceweatherlive.com/es/archivo>.

Para cada evento se realizaron graficas en la cuales se observan las componentes del campo magnético, si como los índices magnéticos terrestres con la finalidad de visualizar el impacto del bloque de plasma sobre la magnetosfera terrestre para identificar el evento de gran escala que la ocasionó. Tales como una EMC o una RIC y así describir las características de cada una de ellas.

RIC	FIRMAS	DESCRIPCION FISICA
Frontera de la RIC: onda de compresivas (choque delantero y reverso)	Aumento en la velocidad, temperatura, densidad, campo magnético y presión total	La fuerte interacción entre las corrientes genera dos ondas compresivas en los bordes de una RIC, por lo que se visualiza el aumento de los parámetros físicos. La compresión es lo suficiente intensa, las ondas compresivas se empujan y forman dos ondas de choque observándose los saltos discontinuos de los parámetros en las firmas <i>in situ</i> .
Dentro de la RIC (viento lento y rápido perturbado)	Aumento en la intensidad del campo magnético, densidad, temperatura y presión total	Las ondas compresivas en la RIC perturban el plasma de tal manera que todos los parámetros se incrementan sin embargo, debido a que las corrientes de viento solar están interactuando tiene distintas características, puesto que, el incremento es diferente a ambos las dos de la IC.
Interface de Corriente (IC)	Brinco anti fase de la temperatura y la densidad (aumenta la temperatura y disminuye la densidad), un pico en la presión total y en la entropía ($\ln \frac{Tp^{1.5}}{Np}$), cambio de dirección de las componentes de la velocidad (Vy, Vz)	La corriente rápida perturba la que viene detrás de la IC ya que es menos densa y por lo tanto se observa un decrecimiento en la densidad, pero su temperatura es mayor por lo que se visualiza al mismo tiempo un incremento. La intensa compresión aumenta la intensidad del campo magnético. la presión total y la entropía alcanzan su valor máximo. Por ser una discontinuidad tangencial, en esta zona las corrientes de Viento Solar son reflejadas, de forma que las componentes de la velocidad exhiben un cambio de dirección.

Tabla 6: Identificación de las RIC. Tomado de: Esmeralda Romero, 2010.

EMCI	FIRMAS	DESCRIPCION FISICA
Choque	Salto discontinuo en velocidad, temperatura, densidad, campo magnético y presión total.	El desplazamiento rápido de la EMCI algunas veces provoca una onda de choque.
Funda	Aumento en la intensidad del campo magnético, incremento de la velocidad, aumento de la densidad y temperatura, aumento de la presión total	El choque comprime y perturba el viento solar ambiente de manera que la intensidad del campo magnético, la velocidad, la densidad y la temperatura aumentan. El aumento de temperatura y campo magnético genera que la presión total incremente.
Eyecta o nube magnética	Campo magnético intenso	Las eyectas se componen de un flujo magnético que está haciendo comprimido por la expansión por lo cual su campo magnético es intenso.
	Baja densidad y temperatura	La expansión de la eyecta provoca que la densidad y la temperatura disminuya.
	$\beta < 1$	Se debe a que la temperatura decrece y el campo magnético aumenta, la presión magnética domina sobre la térmica.
	Rotaciones suaves del campo magnético	Presente solo en las nubes magnéticas. La causa de las rotaciones tiene que ver con la helicidad del campo magnético en el Sol y la rotación diferencial.

Tabla 7: Características para la identificar de EMC. Tomado de: Esmeralda Romero, 2010.

3 Resultados

En este capítulo se presenta el análisis de las 7 tormentas geomagnéticas seleccionadas en un periodo 2015- 2017 fase descendente del ciclo solar 24. En cada caso se utilizaron gráficas para comparar y caracterizar el comportamiento durante eventos solares que generaron perturbaciones del campo magnético y perturbaciones ionosféricas sobre el territorio mexicano.

Cabe resaltar que una de las tormentas geomagnéticas más intensa ocurrió en septiembre del 2017, la cual ha sido estudiada recientemente debido a que ocurre antes que se presentara un terremoto en la ciudad de México. Dicha tormenta está contemplada dentro del periodo del análisis de este trabajo, por lo cual es analizada.

A lo largo de este capítulo de tesis se analizarán las características generales de cada uno de los eventos, así como los diferentes parámetros solares (CME, ráfagas solares, viento solar) que pudieran haber desencadenado perturbaciones ionosféricas. Además, se analizarán con la finalidad de comparar el comportamiento de los índices geomagnéticos nacionales y locales durante eventos solares que generaron perturbaciones ionosféricas sobre el territorio mexicano. Este análisis se basó con datos de 3 días antes y 3 días después de cada evento en el índice Dst, con la finalidad de observar las perturbaciones y compararlos con periodos en que no hay actividad “quietos”. El objetivo de este estudio de tormentas geomagnéticas es analizar el comportamiento de las perturbaciones que ocurren en la ionosfera y los eventos que las provocaron afectando al territorio mexicano.

Lo descrito en este trabajo respecto a las tormentas geomagnéticas y como afectan al campo geomagnético ocasionando perturbaciones fuertes en la ionosfera.

3.1.1 Casos de Estudio

Para cada uno de los caso de estudio se tomaron índices Kp mayores a 4 y Dst -100 nT, además se analizó las perturbaciones e incrementos de anillos de corriente y como afecta a la magnetósfera terrestre.

Con la intención de observar los cambios drásticos según lo descrito en la sección 1.2 de este trabajo con respecto a las corrientes geomagnéticas y como podrían afectar al campo magnético.

Las tormentas geomagnéticas se clasifican generalmente por el valor del índice Dst que da información sobre la variación de la componente horizontal. La tabla 8 muestra los eventos que se originaron en el periodo 2015-2017.

Eve nto	Y/M/D	Ho- ras (UT)	Dst _{max} (nT)	Kp _{max}	Escala NOAA	ΔH	Kmex
1	20150317	23:00	-222	8	G4	-275	7
2	20150622	05:00	-204	8	G4	-200	7
3	20151007	23:00	-124	7	G3	-148	7
4	20151219	23:00	-155	7	G2	-156	6
5	20160306	22:00	-98	7	G3	-110	7
6	20161013	24:00	-104	6	G2	-123	6
7	20170908	02:00	-124	8	G4	152	8

Tabla 8: valores de los índices geomagnéticos el día en el que alcanzan el valor Dst Max.

Para identificar las firmas que indican la presencia de choque en la magnetosfera, se grafica las componentes del viento solar que son: campo magnético, densidad y velocidad. Además se anexa el índice Dst para observar la evolución respecto en el tiempo y la presencia de la posible tormenta geomagnética que la deriva

3.1.2 Criterios de Selección de las Tormentas Geomagnéticas

En esta sección se muestran los criterios de selección de los eventos y la identificación de una ECMEs o/ CIRs.

El origen de las tormentas geomagnéticas estudiadas son ICMEs, salvo las del 7 de Octubre, 19 de Diciembre del 2015 y el 13 de Octubre del 2016 cuyo origen son CIRs. Para la selección de los eventos se tomaron en cuenta la velocidad

del viento solar a gran escala y así como la densidad para identificar las firmas. En la siguiente tabla muestra cuáles de los eventos son CME O SIR.

Evento	Año	Fecha/H	$B_{max}[nT]$	$E_{y_{max}}$ [eV/m]	$N\rho_{max}[cm^{-3}]$	$V_{max}[km/s]$	Fuente
1	2015	0317/	25.2	10	40	520	CME
2	2015	0623/	40.3	20	60.2	710	CME
3	2015	1007/	14	9	38	820	CIR
4	2015	1219/	16.0	6	23.7	709	CIR
5	2016	0306/	12.10	6.5	28.6	625	CME
6	2016	1013/	19.2	8	42.2	700	CIR
7	2017	0908/	25	17	15	800	CME

Tabla 9: Selección de eventos EMC O CIR-

Fuente: http://wwwssc.igpp.ucla.edu/~jlan/STEREO/Level3/STEREO_Level3_Shock.pdf.

Las EMC tipo halo (dirigidas a la Tierra) son la principal causa de las tormentas geomagnéticas intensas. En nuestros casos de estudio, las tormentas geomagnéticas más intensas estuvieron asociadas a EMCs. En particular los casos 1, 2 y 7 fueron los más intensos, pues alcanzaron valores del índice Kp 8 o superior.

Selección de las CME obtenidas del catálogo SOHO/ LASCO

Fecha	Hora (UT)	Velocidad Lineal (km/s)	Región activa asociada	Central (PA)
20150317- 20150318	13:00- 05:00	301	N10W54	Halo
20150622	18:36:05	1065	N13E27	Halo
20151007	07:36:04	900	S20W89	Halo
20151219	13:25:47	797		Halo
20160306	06:24:04	535	N11W16	Halo
20161013	21:29:33	351		Débil
20170906	12:24:05	1571	S10W30	Halo

Tabla 10: EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas

Fuente <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>

3.1.3 Eyecciones de Masa Coronal

A continuación se presentaran aquellos eventos de la tabla 8, cuyas tormentas geomagnéticas fueron provocadas por el arribo de una EMC al ambiente terrestre. Para realizar esto presentaremos una breve introducción del evento en cuestión, esta será acompañada por los registros *in-situ* del viento solar cercano a la Tierra. Finalmente, presentaremos los índices regionales de actividad geomagnética y valores del contenido total de electrones para la región central de México.

- Evento 1: Marzo 20150317

También conocido como “la tormenta del día de San Patricio” puesto que la fase principal de la tormenta geomagnética fue el día 17 de Marzo, día de San Patricio. La tormenta de San Patricio es la de mayor intensidad ocurrida en el descendente ciclo Solar 24. Este evento se originó por el arribo de una CME al ambiente terrestre, la cual estuvo asociada a una fulguración de clase C9.1 acontecida a las 4:30 TU del día 17 Marzo.

La Figura 16, muestra los valores del viento solar cercanos al ambiente espacial terrestre. De arriba abajo se muestran los valores del campo magnético (magnitud y sus tres componentes), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico inducido y la beta del plasma. Los últimos tres paneles muestran los valores de los índices geomagnéticos Kp y Dst, así como la variación temporal del campo eléctrico inducido.

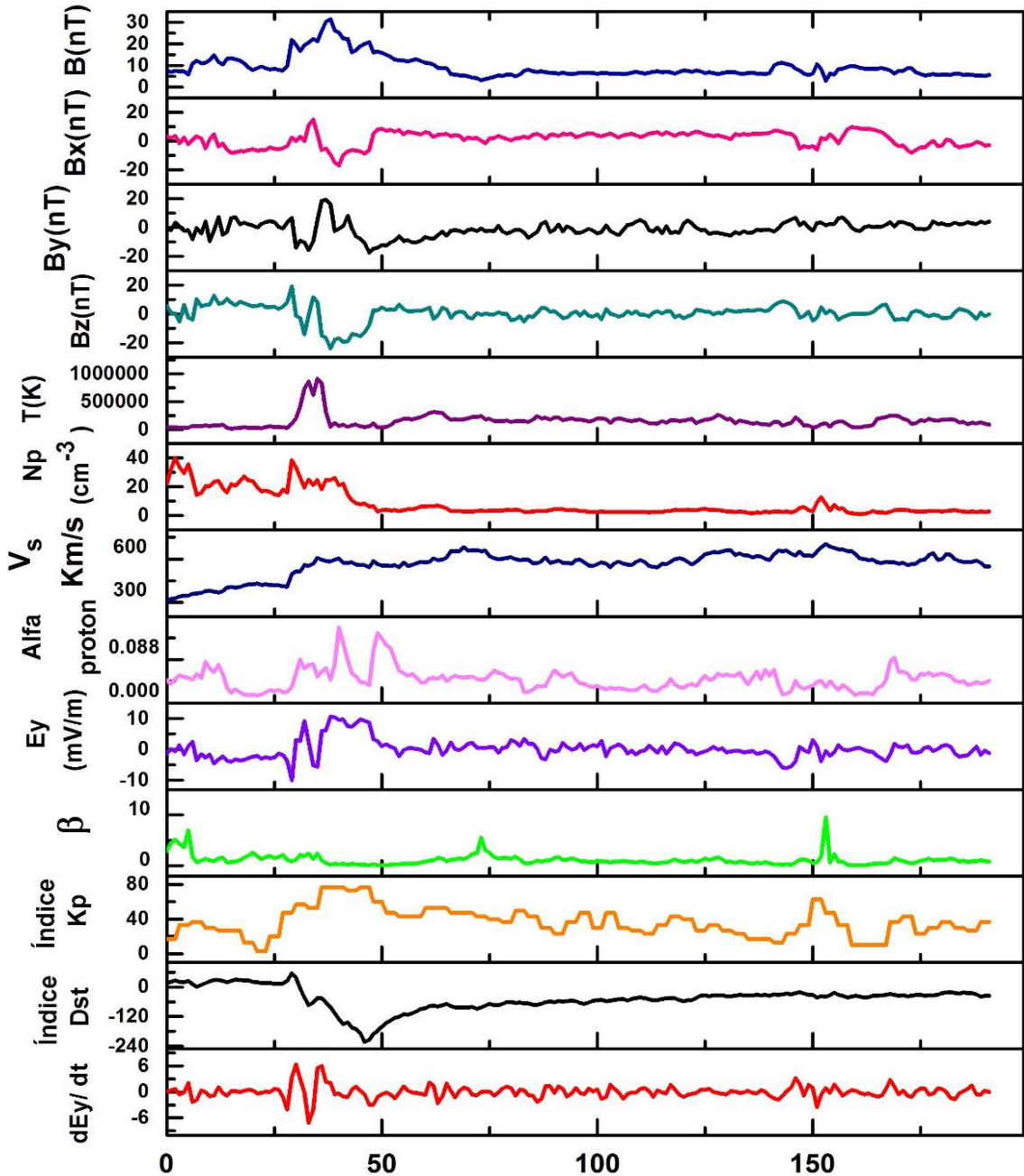
En la figura podemos apreciar el frente de choque como un incremento abrupto en todos los registros *in-situ*. El frente de choque es seguido por la funda, que es viento solar comprimido, calentado y acelerado por el frente de choque. Es importante señalar que, en este caso, la funda presenta una componente Bz sur. Después de la funda viene el material de la EMC, cuya estructura magnética presenta una componente Bz sur significativa también. Estas condiciones dieron inicio a la tormenta geomagnética.

En el panel del índice Dst se observa que la fase inicial y la fase principal de la tormenta se presentan durante el 17 de marzo, alcanzando su máximo a las 23:00 UT. Mientras que la fase de recuperación se prolonga hasta el 23 de marzo, día en que el índice Dst alcanzo valores cercanos a 0 nT.

La tormenta geomagnética alcanzo un valor máximo de Kp=8 entre 12- 15 horas del día 17 de Marzo 2015, Debido a este valor, a esta tormenta se le considera como severa (G4), de acuerdo a clasificación de la NOAA. Por otro lado, de acuerdo a la clasificación de Gonzales et al. (199), esta tormenta se considera intensa, ya que a las 23:00 horas (UT) del 17 de marzo del 2015 alcanzó un valor de Dst=-222 nT.

En el noveno panel, de arriba abajo, se encuentra el campo eléctrico inducido. Los valores positivos de este permiten la reconexión magnética entre el viento solar y campo magnético terrestre. Adicionalmente, el campo eléctrico inducido también está relacionado con los índices Kp y Dst (paneles 11 y 12), donde se observa que periodos de incrementos positivos en Ey, provocan crecimientos (decrementos) significativos en el primero (segundo).

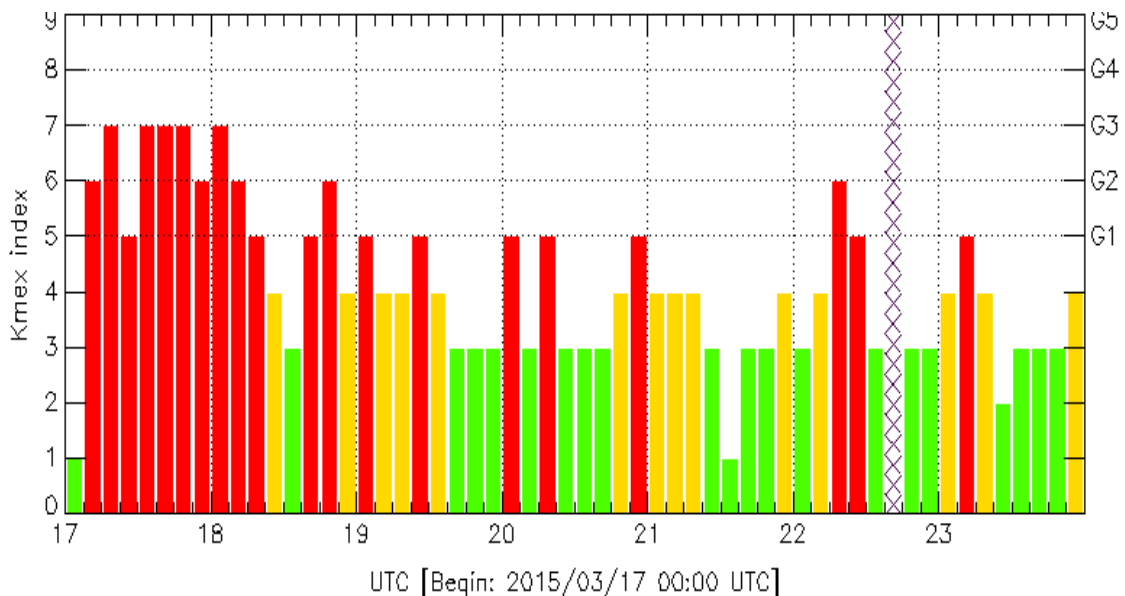
En tanto el plasma beta e índice Dst decaen abruptamente, A si como se observa en los siguientes paneles que ya se describieron.



Marzo 2015

Figura16: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 16 al 23 de marzo 2015. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (magnitud y sus tres componentes), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos Kp y Dst, y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 16/03/2015.

La tormenta de San Patricio tuvo repercusiones regionales en México, puesto que sus efectos se aprecian con claridad en los índices Kmex, así como en el DELTA H. La Figura 17, muestra los valores del índice Kmex entre los días 17 y 23 de marzo. En la figura se aprecia que los días 17 y 18 el campo magnético regional estuvo intensamente alterado, alcanzando en varias ocasiones el valor Kmex=7. Posterior a estas fechas, el campo magnético regional estuvo constantemente perturbado e incluso, el día 22 de marzo alcanzó el valor de Kmex=6. En cuanto respecta a los efectos durante el evento de Marzo del 2015, conocido como evento del día de San Patrick, fue de gran impacto que en México que el índice delta H regional se observó una compresión en el anillo de corriente antes de observar un abrupto decaimiento, para ello el índice K local mexicano se observa como incrementa súbitamente, pues de observar un índice k=3 se incrementa a 6, debido al ingreso de partículas energéticas provenientes del viento solar debido a la Eyección de Masa Coronal registrada.



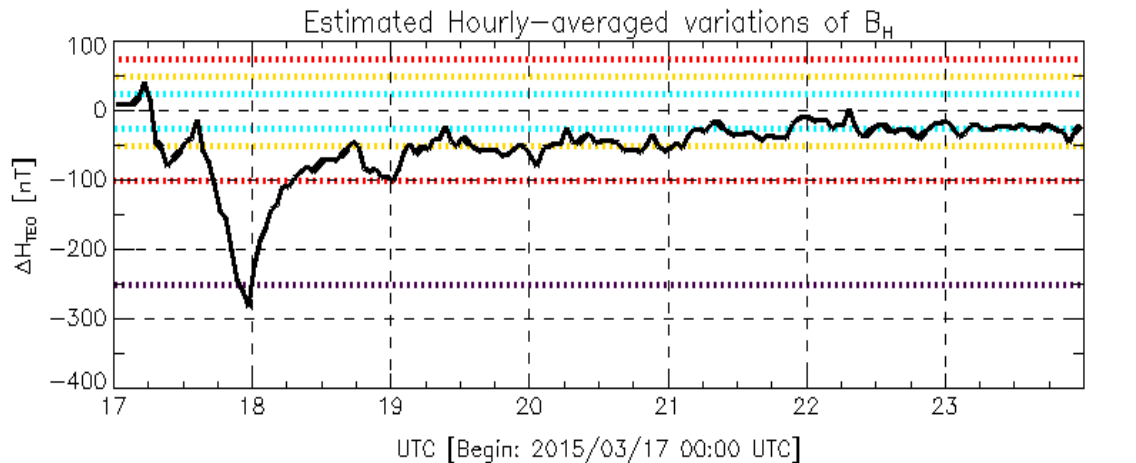
ANCE/SCIEMEX – Morelia, Mich., MX

Updated: 2017/06/15–18:23 UTC

Figura 17: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex para el periodo del 17 al 23 de Marzo del 2015. Fuente: LANCE/SCIEMEX, 2017.

La Figura 18, muestra los valores del índice regional DELTA H. En la figura observamos que la tormenta geomagnética muestra las 3 fases características: La primera fase, el comienzo súbito, es un ligero aumento, debido a la compresión de la magnetosfera provocada por la llegada de la onda de choque en las primeras horas del 17 de Marzo. La segunda fase, la fase principal, estuvo formada por dos etapas claramente distintas. La primera es un descenso súbito provocado por la reconexión el cual alcanza alrededor de los -90nT. Mientras que la segunda etapa, se trata de un descenso es debido a la interacción del material de la EMC, este es claramente más intenso que el primero y lleva la índice DELTA H a alcanzar casi los -280 nT al final del día 17 de marzo.

A partir de las primeras horas del día 18 de marzo inicia la tercera fase de la tormenta, la recuperación. Esta fase se prolongó hasta las 03:00 horas del 21 de Marzo cuando se alcanza el valor mínimo. Sin embargo, a lo largo de esta etapa se pueden observar alteraciones en el índice DELTA H. Esto indica que el campo magnético regional estuvo perturbado intensamente durante la fase de recuperación. Estas perturbaciones se mantuvieron hasta el día 25 de Marzo, fecha para la cual se alcanza un estado quieto duradero.



Color Code: ---- weak, ---- moderate, ---- intense, ---- extreme, ---- data not available.

TEO: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)

LANCE/SCIESMEX - Morelia, Mich., MX

Updated: 2017/10/04-23:25 UTC

Figura 18: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo del 17 al 23 de Marzo del 2015. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

Los efectos regionales de este evento también se aprecian en el estado de la ionosfera sobre México. La figura 19, muestra los valores calculados para el contenido total de electrones (TEC) y los valores esperados del (TEC-Med.). En la

figura se aprecian incrementos significativos respecto de la mediana, durante los días 17 y 18 de Marzo. Este tipo de incrementos en la densidad de electrones tiene un impacto negativo en un amplio sector de servicios de telecomunicaciones y geo posicionamiento.

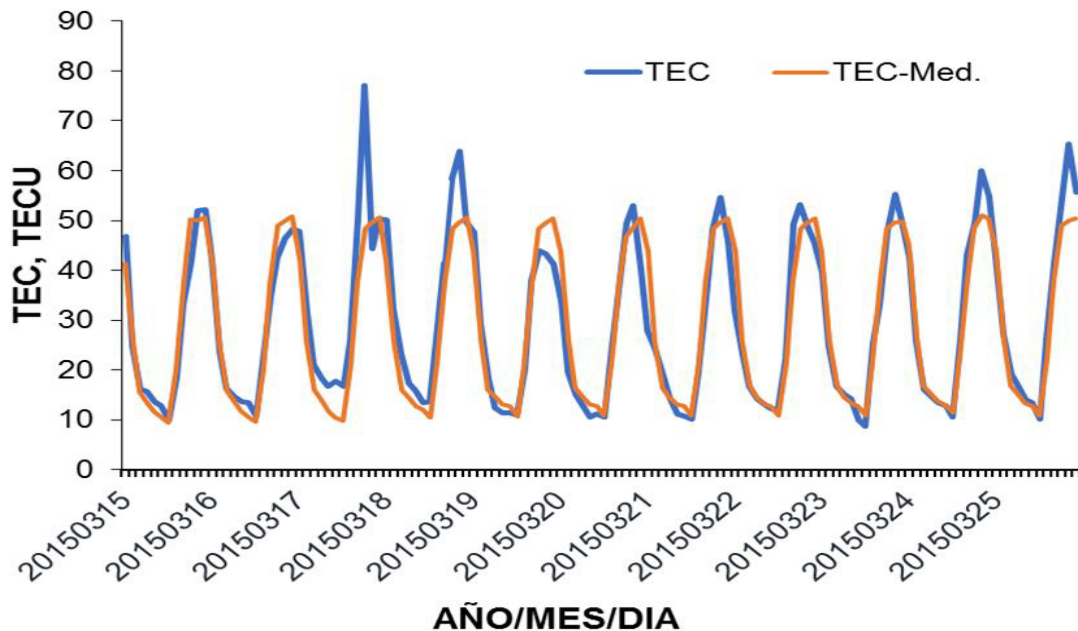


Figura 19: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALOCNet (Aguas calientes).

- Evento 2: Junio 20150622

La EMC, al ser expulsada del Sol interacciona con el medio interplanetario a estas estructuras que están en el medio interplanetario se les conoce como Eyecciones de Masa Interplanetarias (EMCI) y su evolución por el paso del medio interplanetarias son captadas por los satélites que se encuentra entre el espacio cercano Sol –Tierra y se les conoce como firmas In situ, en la figura 23, muestra los valores del viento solar cercanos al ambiente espacial terrestre. De arriba abajo se muestran los valores del campo magnético (magnitud y sus tres componentes), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico inducido y la beta del plasma. Los últimos tres paneles muestran los valores de los índices geomagnéticos Kp y Dst, así como la variación temporal del campo eléctrico inducido.

En la figura 20, podemos apreciar el frente de choque como un incremento abrupto en todos los registros in-situ. El frente de choque es seguido por la funda, que es viento solar comprimido, calentado y acelerado por el frente de choque. Es importante señalar que, en este caso, la funda presenta una componente Bz sur. Después de la funda viene el material de la EMC, cuya estructura magnética presenta una componente Bz sur significativa también. Estas condiciones dieron inicio a la tormenta geomagnética.

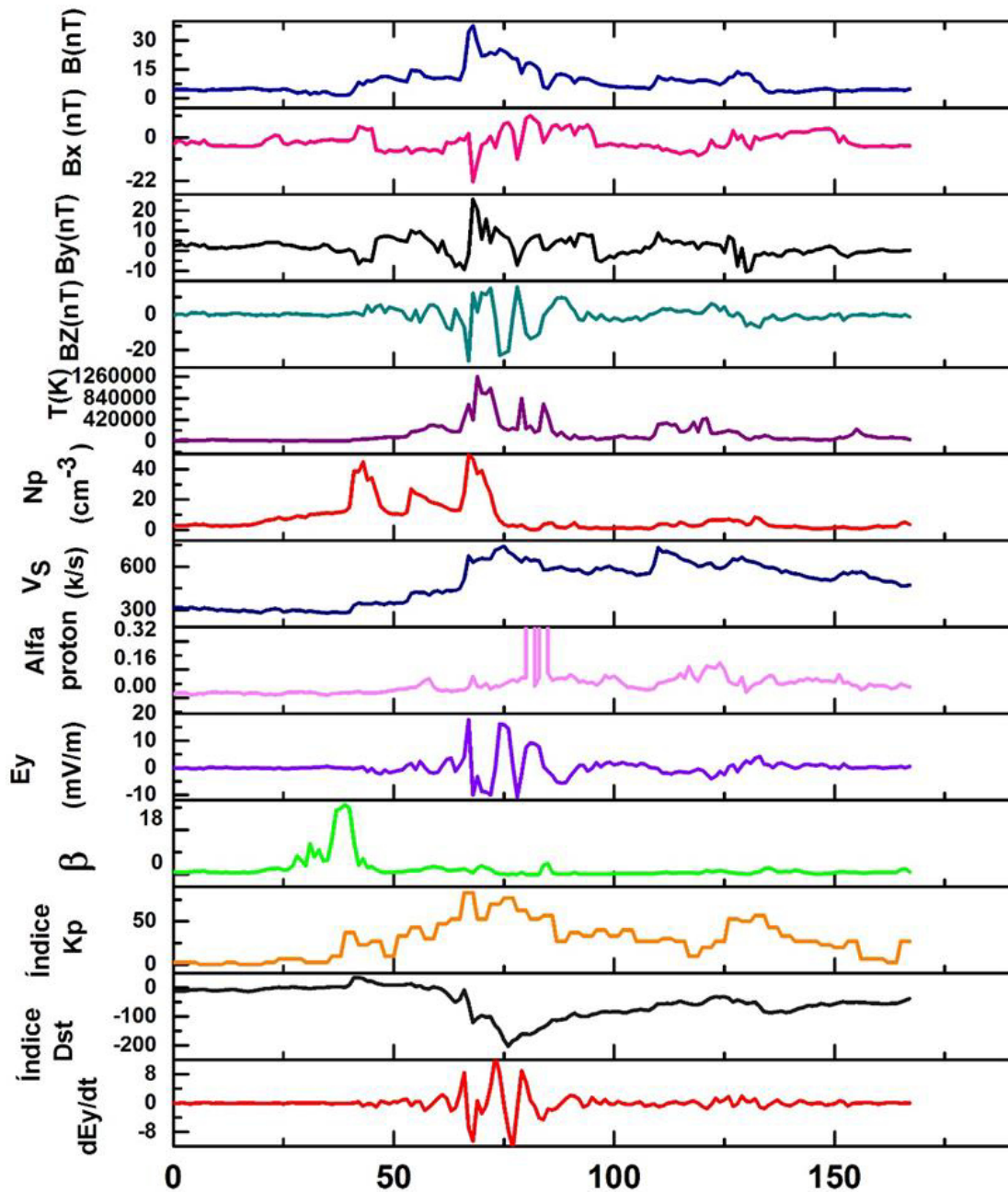
En el panel del índice Dst se observa un incremento de 35 nT durante las 19:00 horas UT del día 21 de Junio, durante las últimas horas del día 22 y a las primeras horas del día 23 se observa un decremento del índice Dst -204 nT. Así mismo ocurre un aumento en los valores de la densidad y velocidad del viento solar alcanzando valores de 18 cm^{-3} y 680 km/s. la componente Bz alcanza un valor negativo de -28 nT a las 20:00 horas UT del 22 de Junio.

La tormenta geomagnética alcanzó un valor máximo de $K_p=8$ entre 18- 21 horas del día 22 de Junio 2015, Debido a este valor, a esta tormenta se le considera como severa (G4), de acuerdo a clasificación de la NOAA. Por otro lado, de acuerdo a la clasificación de Gonzales et al. [1994], esta tormenta se considera intensa, ya que a las 21:00 horas (UT) del 22 de Junio del 2015 alcanzó un valor de $Dst=-121 \text{ nT}$ y el 23 de junio a las 5:00 horas alcanzó valores de -204 nT.

En el noveno panel, de arriba abajo, se encuentra el campo eléctrico inducido. Los valores positivos de este permiten la reconexión magnética entre el viento solar y campo magnético terrestre. Adicionalmente, el campo eléctrico inducido también está relacionado con los índices K_p y Dst (paneles 11 y 12), donde se observa que periodos de incrementos positivos en E_y , provocan crecimientos (decrementos) significativos en el primero (segundo).

En tanto el plasma beta e índice Dst decaen abruptamente hasta -222nT. A si como se observa en los siguientes paneles que ya se describieron.

Como se observa en las gráficas la CME fue de clase M6.6, en el cual se aprecia el súbito incremento a al cual viene primero un corriente de viento solar lento y al interactuar con el medio interplanetario.



Junio 2015

Figura 20: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de la actividad geomagnética durante el día 20 al 26 de Junio del 2015. De los paneles de arriba hacia abajo se muestran en primer panel: el campo magnético y sus componentes (B , B_x , B_y y B_z), temperatura, densidad de protones, magnitud de la velocidad, campo eléctrico, plasma beta, además de los ín-

dices geomagnéticos terrestres K_p , Dst y la variación temporal del campo eléctrico. La resolución de los datos es de 1 hora, e iniciando a partir de las 0:00 horas del día 20/06/2015 y finalizando el día 26/06/2015 a las 23:00 horas

Durante la tormenta geomagnética de Junio 23 del 2015, en el índice K_{mex} se observa el abrupto incremento como se observa en la figura 21, aunque en días anteriores ya se venía observando el incremento del índice, además en los días posteriores a la tormenta el índice decremto lentamente.

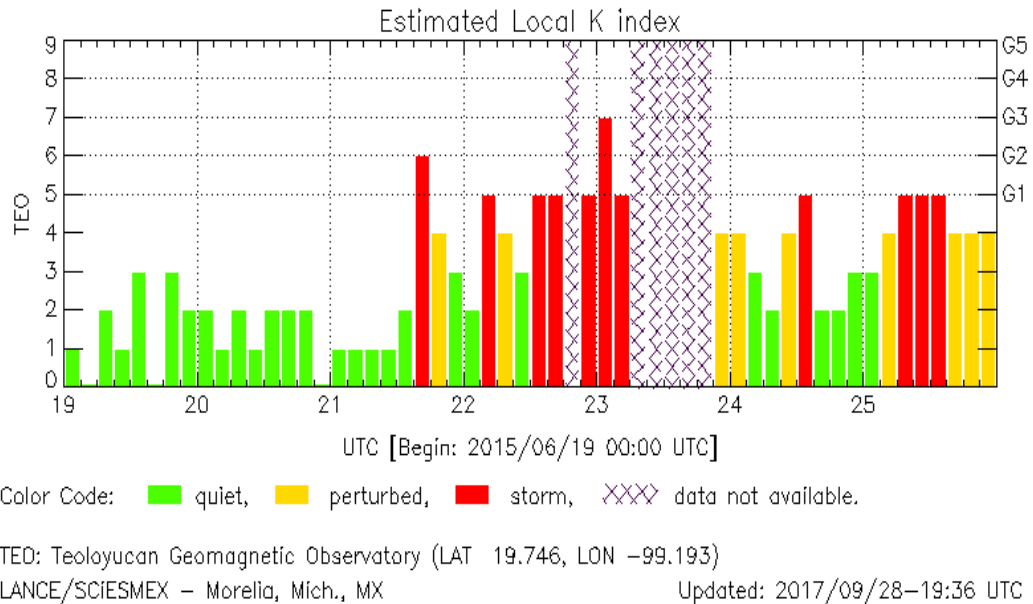
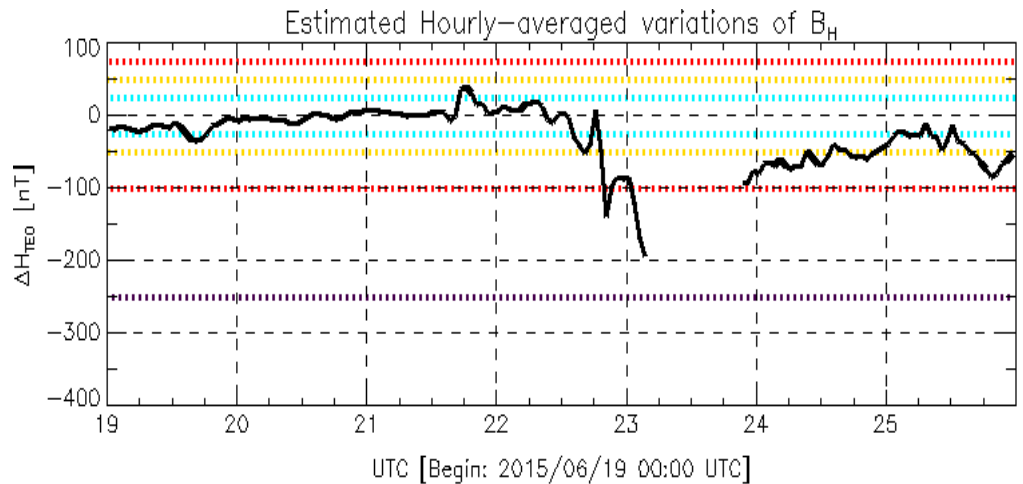


Figura 21: Valores del índice de actividad geomagnética regional K_{mex} para el periodo del 19 al 25 de Junio del 2015. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

En contraste con el índice ΔH en la figura 22, se observa un decaimiento de -200 nT, en esta grafica se observa el inicio del evento, fase principal y la fase de recuperación. Durante el proceso de recuperación un GAP (la nave no capturo los datos) que dificulto el análisis.



Color Code: weak, moderate, intense, extreme, —— data not availa

TEO: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)

LANCE/SCIESMEX – Morelia, Mich., MX

Updated: 2017/10/04–23:25 U

Figura 22: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo del 19 al 25 de Junio del 2015. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017

Los efectos regionales de este evento también se aprecian en el estado de la ionosfera sobre México. La figura 23, muestra los valores calculados para el contenido total de electrones (TEC) y los valores esperados del (TEC-Med.). En la figura se aprecian incrementos significativos respecto de la mediana, durante el día 22, para el día 23 de Junio se aprecia un decaimiento considerado. Este tipo de incrementos y en la densidad de electrones tiene un impacto negativo en un amplio sector de servicios de telecomunicaciones y geo posicionamiento.

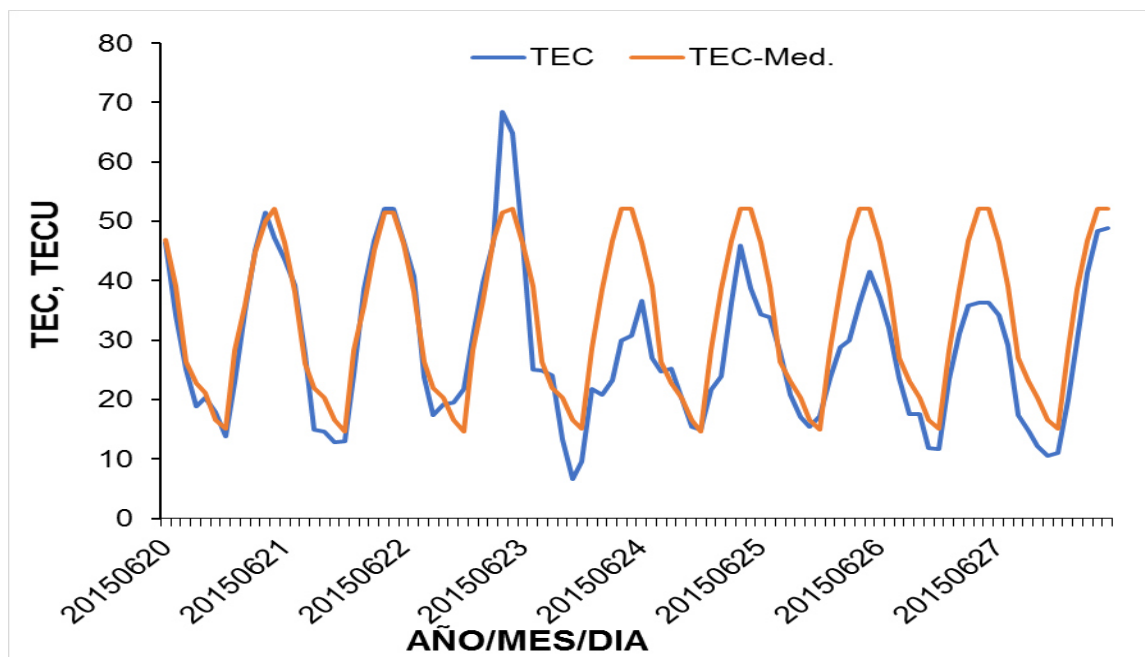


Figura 23: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALOCNet (Aguas calientes).

- Evento 5: Marzo 20160306

Este evento se originó por una fulguración de clase C acontecida a las 08:28 TU del día 4 Marzo.

el arribo de una EMC al ambiente terrestre, la cual estuvo asociada La Figura 24, muestra los valores del viento solar cercanos al ambiente espacial terrestre. De arriba abajo se muestran los valores del campo magnético (magnitud y sus tres componentes), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico inducido y la beta del plasma. Los últimos tres paneles muestran los valores de los índices geomagnéticos Kp y Dst, así como la variación temporal del campo eléctrico inducido.

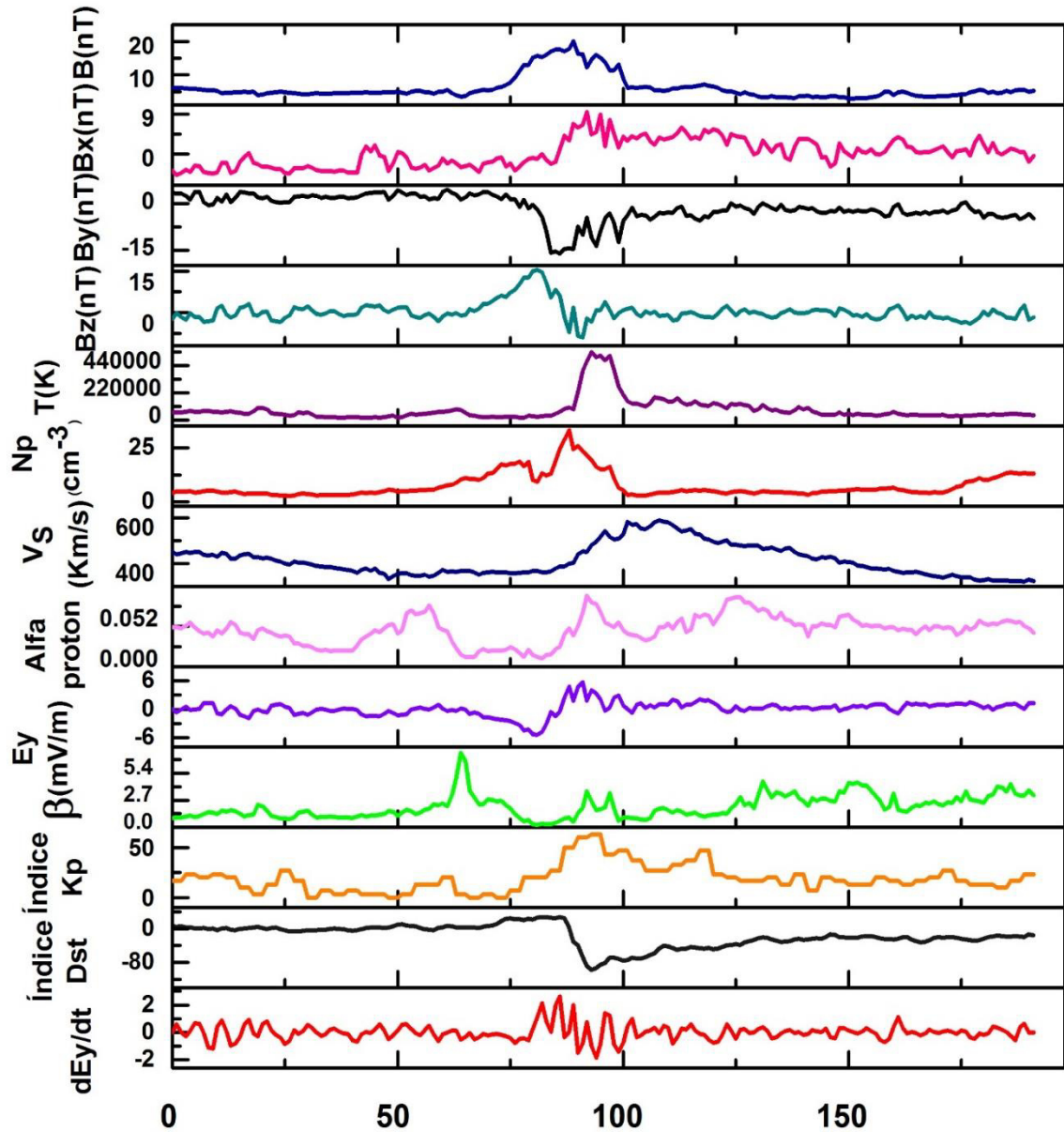
En la figura podemos apreciar el frente de choque como un incremento abrupto en todos los registros in-situ. El frente de choque es seguido por la funda, que es viento solar comprimido, calentado y acelerado por el frente de choque. Es importante señalar que, en este caso, la funda presenta una componente Bz sur. Después de la funda viene el material de la EMC, cuya estructura magnética presenta una componente Bz sur significativa también. Estas condiciones dieron inicio a la tormenta geomagnética.

En el panel del índice Dst se observa que la fase inicial y la fase principal de la tormenta se presentan durante el 06 de marzo, alcanzando su máximo a las 22:00 UT. Mientras que la fase de recuperación se prolonga hasta el 10 de marzo, día en que el índice Dst alcanzó valores cercanos a 0 nT.

La tormenta geomagnética alcanzó un valor máximo de Kp=7 entre 21- 0:00 horas del día 6 de Marzo 2016, Debido a este valor, a esta tormenta se le considera como severa (G4), de acuerdo a clasificación de la NOAA. Por otro lado, de acuerdo a la clasificación de Gonzales et al. (199), esta tormenta se considera intensa, ya que a las 22:00 horas (UT) del 06 de marzo del 2015 alcanzó un valor de Dst=-98 nT.

En el noveno panel, de arriba abajo, se encuentra el campo eléctrico inducido. Los valores positivos de este permiten la reconexión magnética entre el viento solar y campo magnético terrestre. Adicionalmente, el campo eléctrico inducido también está relacionado con los índices Kp y Dst (paneles 11 y 12), donde se observa que periodos de incrementos positivos en Ey, provocan crecimientos (decrementos) significativos en el primero (segundo).

En tanto el plasma beta e índice Dst decaen abruptamente, A si como se observa en los siguientes paneles que ya se describieron.



Marzo 2016

Figura 24: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 03 al 10 de marzo 2016. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (B, Bx, By, Bz), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos Kp y Dst, y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 03/03/2015 a las 23.00 horas de 10/03/2016.

La tormenta de Marzo no tuvo grandes repercusiones regionales en México, puesto que sus efectos se aprecian con claridad en los índices Kmex, así como en el DELTA H. La Figura 25, muestra los valores del índice Kmex entre los días 4 y 10 de Marzo en el cual se aprecia que los días 6 y 7 el campo magnético regional estuvo alterado, alcanzando el valores Kmex=7.

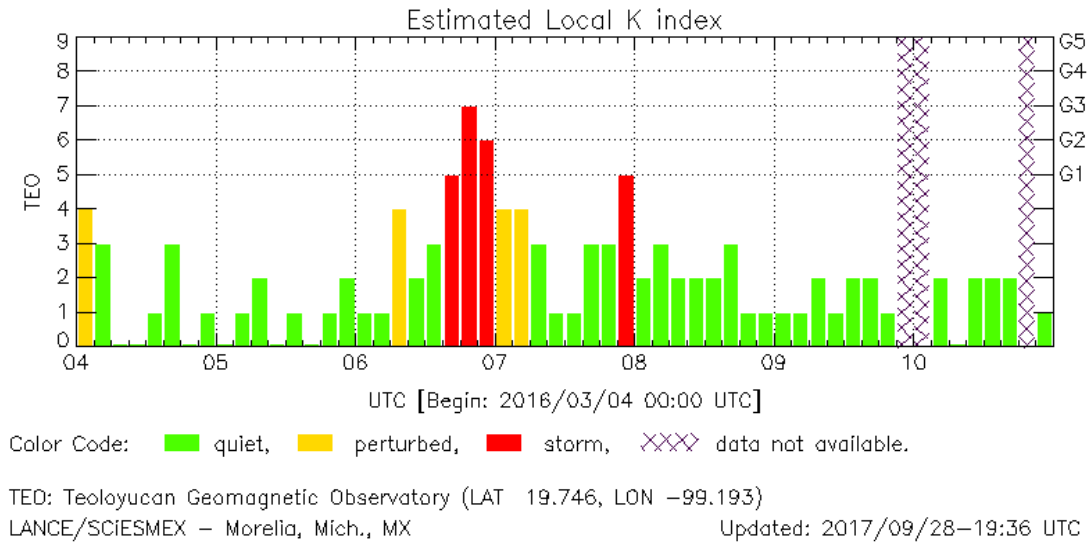


Figura 25: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex para el periodo del 04 al 10 Marzo del 2016. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

Posteriormente en la figura 26, se observa la perturbación del índice regional DELTA H con una compresión en el anillo de corriente antes de observar un decaimiento de -110 nT.

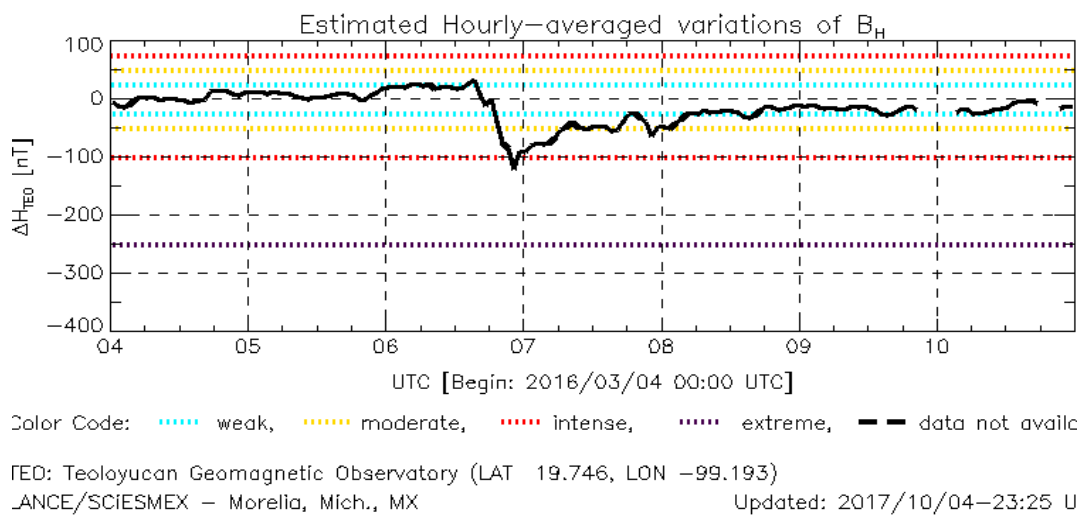


Figura 26: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo del 04 al 10 de Marzo del 2016. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017

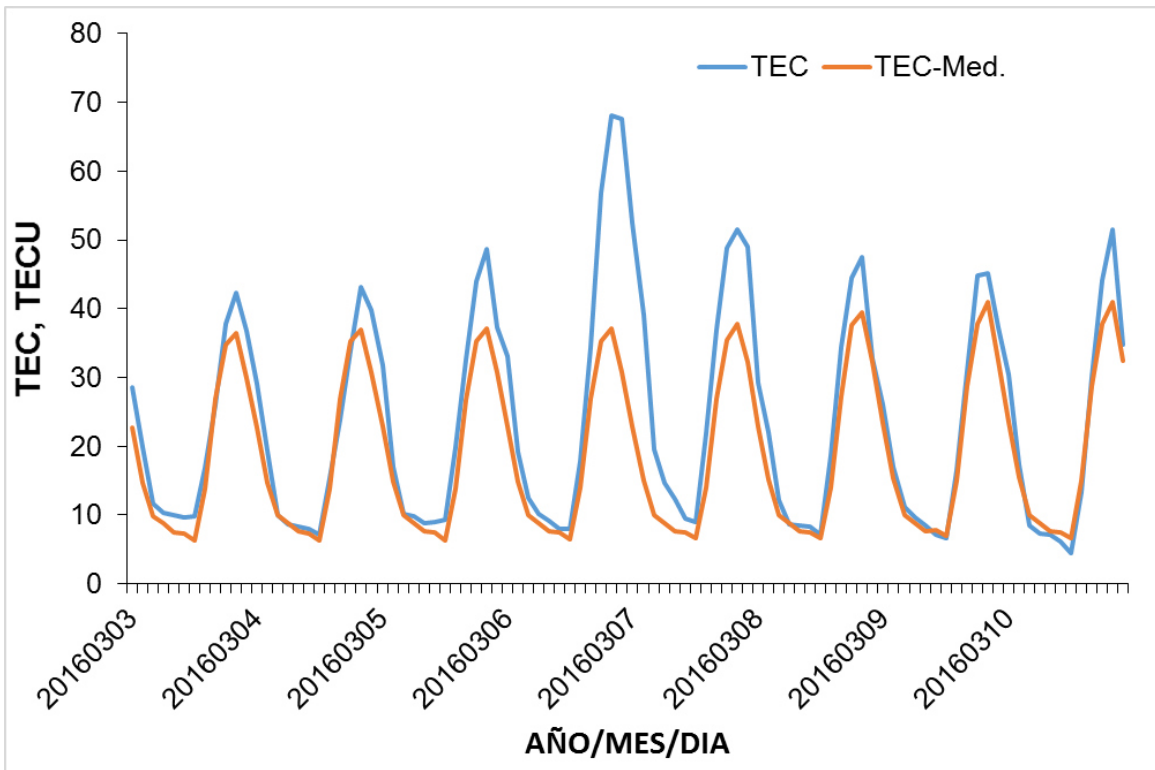


Figura 27: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALOCNet (Aguas calientes).

- Evento 7: Septiembre 20170906

Este evento es el segundo más fuerte del descendente ciclo solar 24 se originó por el arribo de una EMC al ambiente terrestre, la cual estuvo asociada a dos fulguración la primera de clase M9.3 a las 07:00 horas (UT) y la segunda de X8.2 a las 15.35 horas(UT) acontecida el día 6 de Septiembre.

La Figura 28, muestra los valores del viento solar cercanos al ambiente espacial terrestre. De arriba abajo se muestran los valores del campo magnético (magnitud y sus tres componentes), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico inducido y la beta del plasma. Los últimos tres paneles muestran los valores de los índices geomagnéticos Kp y Dst, así como la variación temporal del campo eléctrico inducido.

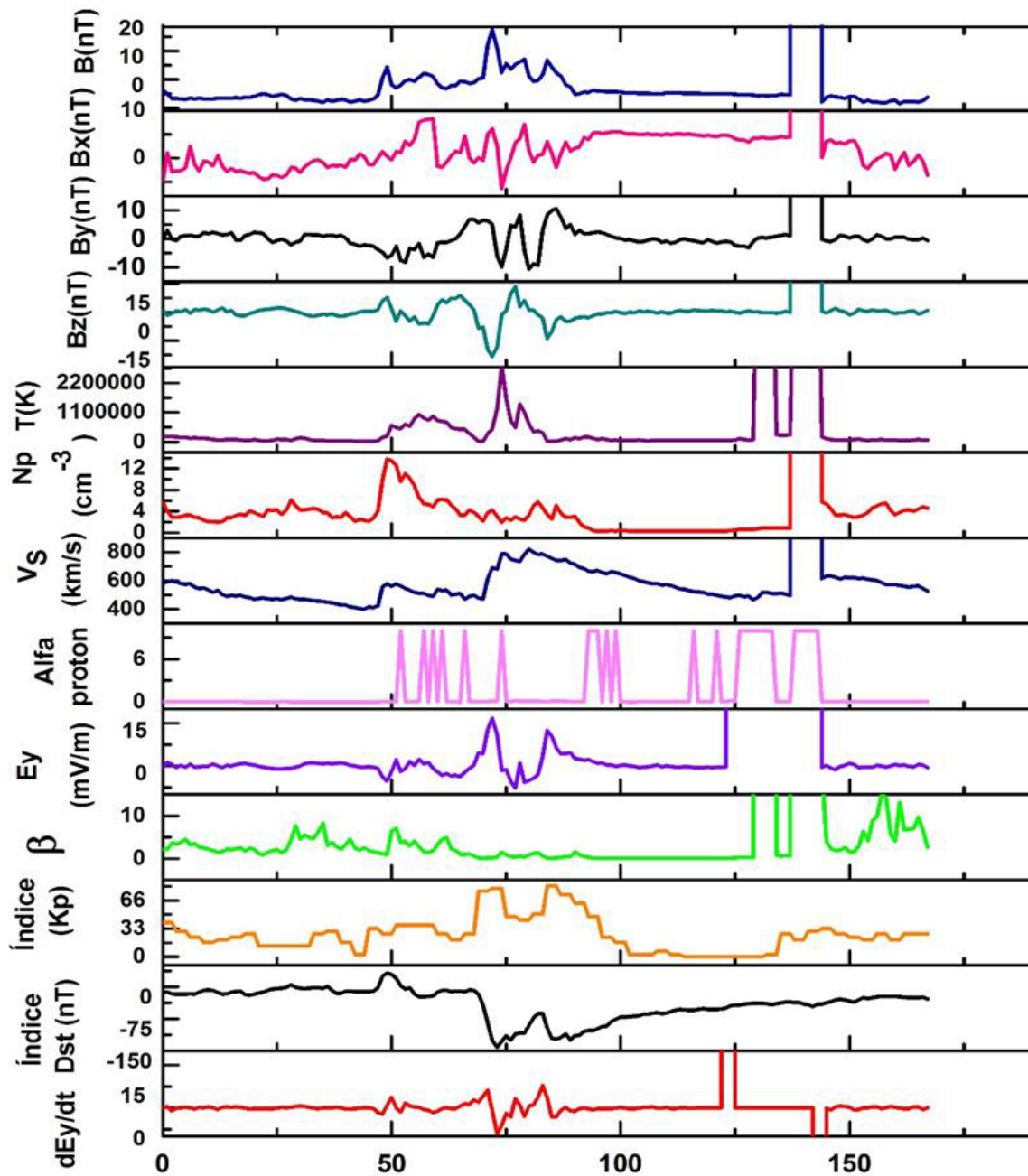
En la figura podemos apreciar el frente de choque como un incremento abrupto en todos los registros in-situ. El frente de choque es seguido por la funda, que es viento solar comprimido, calentado y acelerado por el frente de choque. Es importante señalar que, en este caso, la funda presenta una componente Bz sur Después de la funda viene el material de la EMC, cuya estructura magnética presenta una componente Bz sur significativa también. Estas condiciones dieron inicio a la tormenta geomagnética.

En el panel del índice Dst se observa que la fase inicial y la fase principal de la tormenta se presentan durante el 08 de Septiembre, alcanzando su máximo a las 02:00 UT. Mientras que la fase de recuperación se prolonga hasta el 10 de Septiembre, día en que el índice Dst alcanzo valores cercanos a 0 nT.

La tormenta geomagnética alcanzo un valor máximo de Kp=8 entre 0:00- 21 horas del día 08 de Septiembre 2017, Debido a este valor, a esta tormenta se le considera como severa (G4), de acuerdo a clasificación de la NOAA. Por otro lado, de acuerdo a la clasificación de Gonzales et al. (199), esta tormenta se considera intensa, ya que a las 02:00 horas (UT) del 08 de Septiembre del 2017 alcanzó un valor de Dst=-124 nT.

En el noveno panel, de arriba abajo, se encuentra el campo eléctrico inducido. Los valores positivos de este permiten la reconexión magnética entre el viento solar y campo magnético terrestre. Adicionalmente, el campo eléctrico inducido también está relacionado con los índices Kp y Dst (paneles 11 y 12), donde se observa que periodos de incrementos positivos en Ey, provocan crecimientos (decrementos) significativos en el primero (segundo).

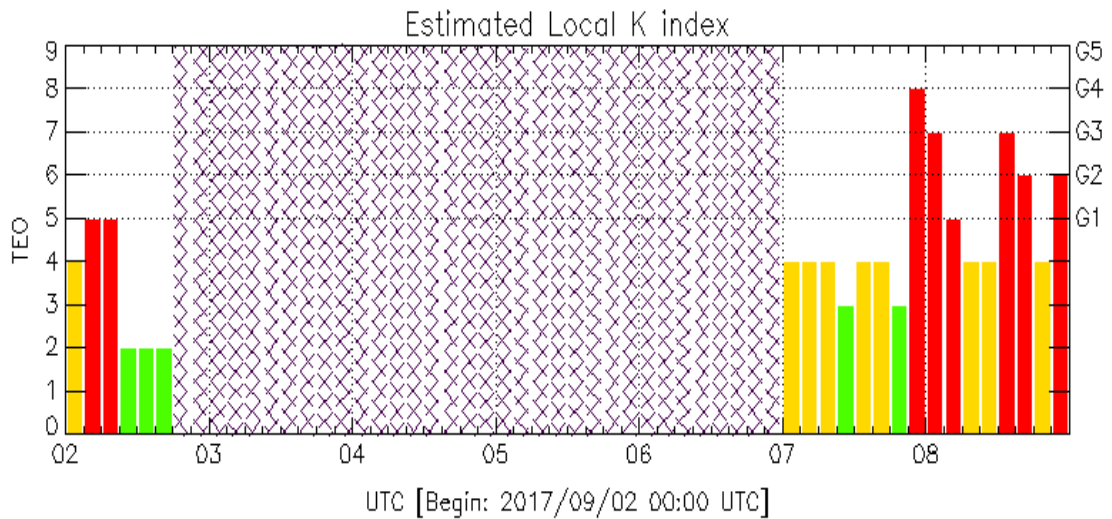
En tanto el plasma beta e índice Dst decaen abruptamente, A si como se observa en los siguientes paneles que ya se describieron.



Septiembre 2017

Figura 28: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 05 al 11 de Septiembre 2017. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (B, Bx, By, Bz), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos Kp y Dst, y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 05/09/2017 a las 23.00 horas de 11/09/2017.

Esta tormenta geomagnética tuvo repercusiones en México, debido a que sus efectos se observan con claridad en los índices Kmex y DELTA H. En la figura 29, muestra los valores del índice Kmex entre los días 02 y 08 de Septiembre. En la figura se aprecia que los días 3 y 6 un GAP (datos faltantes) debido a un fallo en el sistema, no obstante el día 7 de Septiembre se observa que el campo magnético aun continuaba alterado con valores de Kmex=8. Posterior a estas fechas, el campo magnético regional estuvo perturbado.



Color Code: ■ quiet, ■ perturbed, ■ storm, data not available.

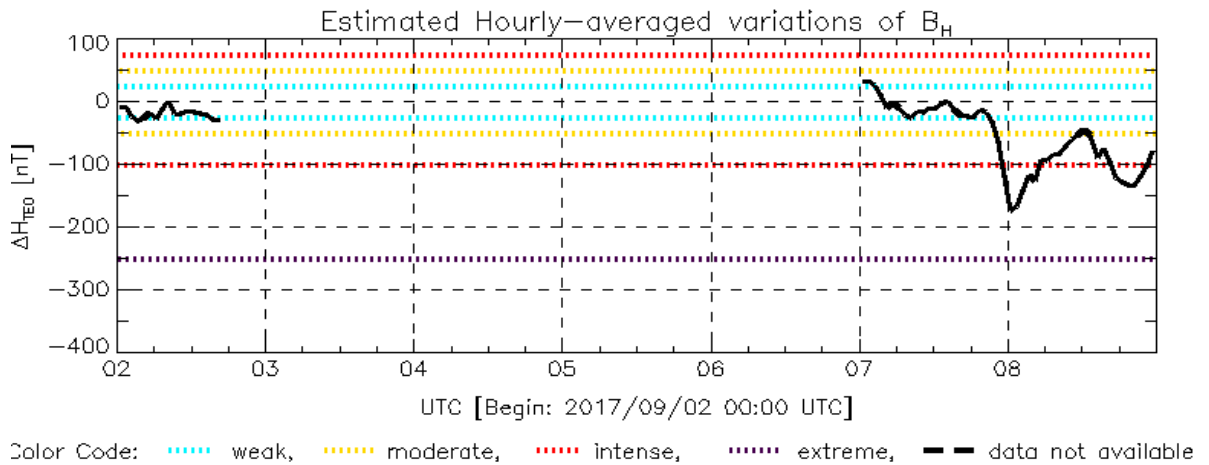
TEO: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)

LANCE/SCIESMEX – Morelia, Mich., MX

Updated: 2017/09/28-19:36 UTC

Figura 29: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex para el periodo del 02 al 08 de Septiembre del 2017. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017

En cuanto respecta a los efectos durante el evento de Septiembre del 2017, en la figura 30, se observa que fue de gran impacto en México, ya que el índice DELTA H regional presenta una compresión en el anillo de corriente antes de observar un abrupto decaimiento en el día 8 de -170nT debido al ingreso de partículas energéticas provenientes del viento solar debido a la Eyección de Masa Coronal registrada.



FED: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)
 ANCE/SCIESMEX - Morelia, Mich., MX Updated: 2017/10/04-23:25 UTC
Figura 30: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo del 02 al 08 Septiembre del 2017. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

Los efectos regionales de este evento también se aprecian en el estado de la ionosfera sobre México. La figura 31, muestra los valores calculados para el contenido total de electrones (TEC) y los valores esperados del (TEC-Med.). En la figura se aprecian incrementos significativos respecto de la mediana, durante el día 5, para el día 11 de Septiembre se aprecia un decaimiento considerado. Este tipo de incrementos y en la densidad de electrones tiene un impacto negativo en un amplio sector de servicios de telecomunicaciones y geo posicionamiento.

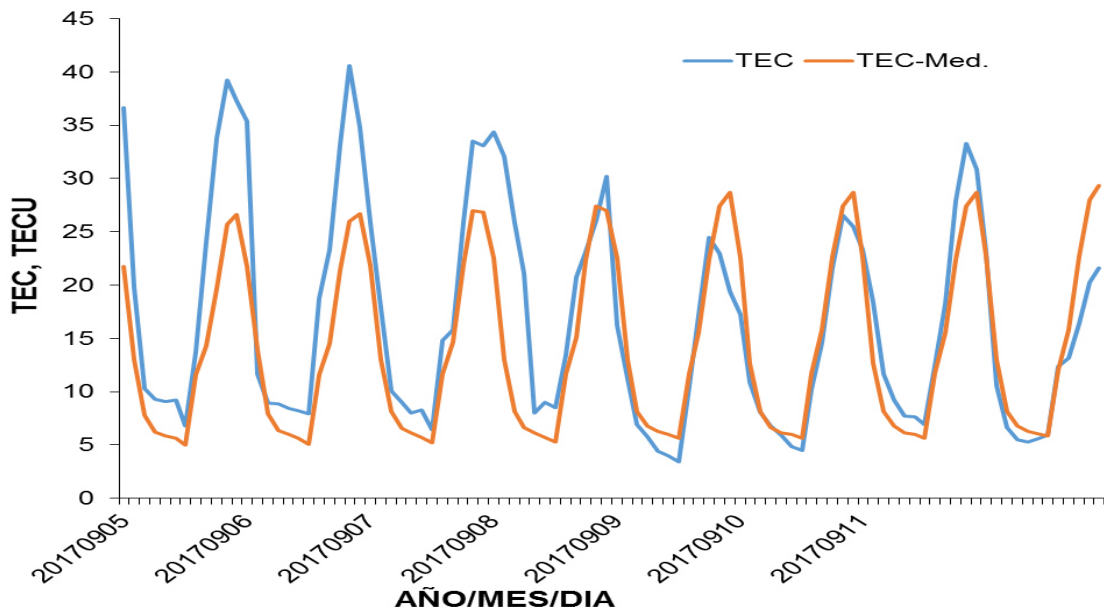


Figura 31: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALOCNet (Aguas calientes).

3.1.4 Regiones de Interacción de Corriente

La actividad geomagnética es causada por eventos de corrientes de alta velocidad/Regiones de Interacción Coronaria (CIR), durante la fase descendente de la actividad solar en el ciclo solar 24. Las regiones de interacción coronaria se crean por la interacción de flujos rápidos y flujos lentos expulsados por agujeros coronales de larga duración en el Sol. Esta interacción conduce a un aumento en el campo magnético del medio interplanetario (IMF) que da origen a la actividad geomagnética debido a la interacción con la magnetosfera de la Tierra.

- Evento 3: Octubre 20151008

Para este evento, se analizó la región de interacción que derivó a la tormenta geomagnética. Además, la ionosfera también puede verse afectada por estos fenómenos de diferentes maneras, como un aumento o disminución de la ionización plasmática. Por lo tanto la geomagnética ocurrida en Octubre.

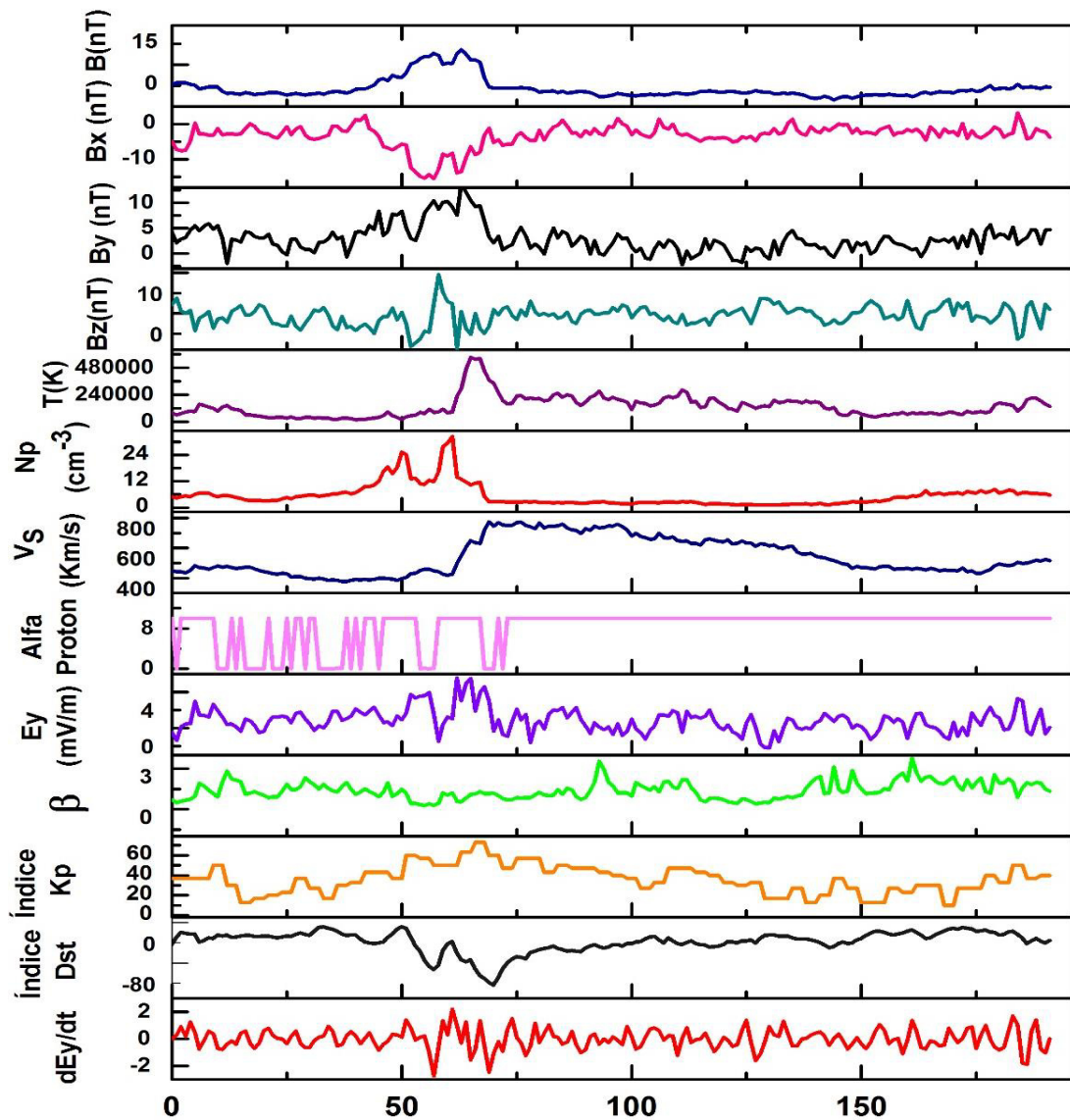
Aunque muchas tormentas geomagnéticas están asociadas con las nubes de material solar que estallan en el Sol llamado EMC, esta tormenta geomagnética fue causada por una corriente de viento solar rápido. Para el estudio de evento se analizaron los parámetros del viento solar para detectar el origen que ocasiona la tormenta geomagnética. Durante los días 6,7 y 8 se produjeron eventos geomagnéticos en el Sol que ocasionaron afectaciones a la Tierra.

En la figura 32, se observan en los paneles el frente de choque de la CIR aumento en los parámetros del campo magnético, en donde la B aumenta considerablemente a 20nT, en tanto que la Bx decreció a -16nT. La temperatura $6 \times 10^5 K$ y la velocidad aumentan a 750 km/s, además que se mantuvo perturbado el campo eléctrico a lo que se visualiza un incremento positivo de 6mV/m. Con los índices geomagnéticos el Dst decreció a -148nT, y un aumento en el índice Kp

El índice Kp indica las perturbaciones en la componente horizontal del campo magnético, en el cual se observa en la gráfica que indican una tormenta geomagnética severa con un índice Kp de 4 que se eleva súbitamente a 7.

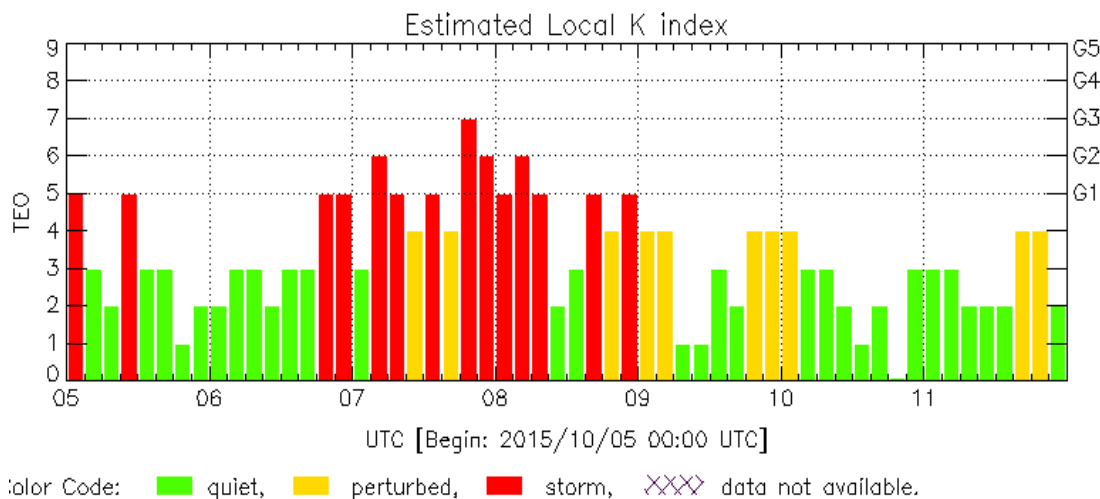
El valor del índice Dst nos indica cambios en la intensidad del campo geomagnético. En tanto los valores negativos indican una posible tormenta geomagnética y positiva indica una compresión del campo geomagnético.

Además de las gráficas siguientes que muestran las perturbaciones regionales mexicanas en la que se describe el nivel de la perturbación que afectó a altitudes medias como es el caso de México, con un índice Kmex de 7 y un delta H de -145 nT puesto que, el día de la tormenta este índice decayó. Además en la gráfica del TEC muestra el nivel de la perturbación de la ionosfera.



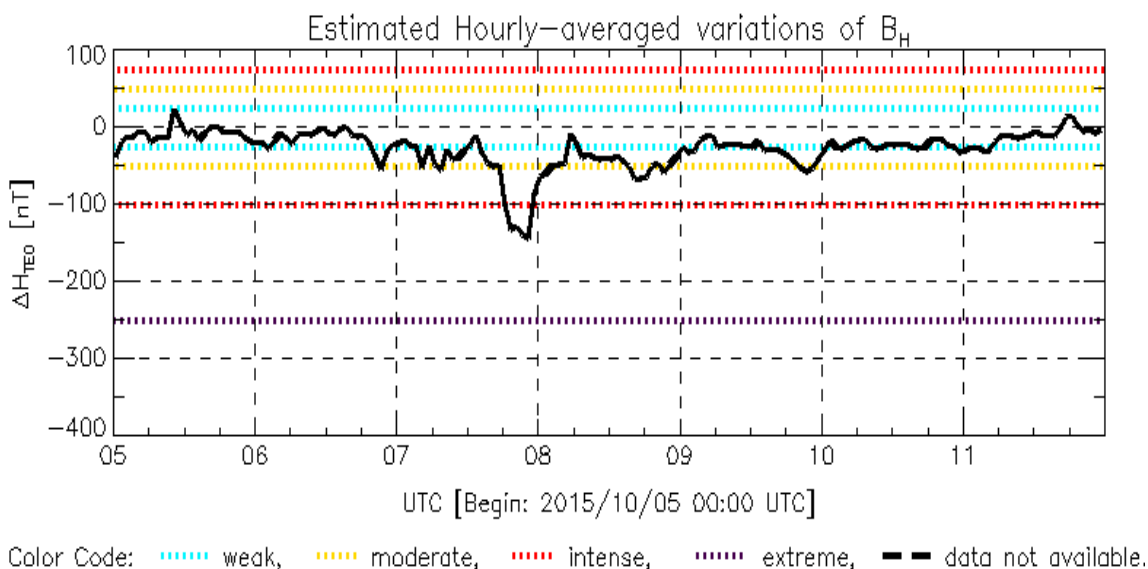
Octubre 2015

Figura 32: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 05 al 12 de Octubre 2015. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (B, Bx, By, Bz), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos Kp y Dst, y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 05/10/2015 a las 23.00 horas de



TEO: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)
 ANCE/SCIEMEX - Morelia, Mich., MX Updated: 2017/09/28-19:36 UTC

Figura 33: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex para el periodo del 05 al 11 de Octubre del 2015. Fuente: LANCE/SCIEMEX, 2017.



TEO: Teoloyucan Geomagnetic Observatory (LAT 19.746, LON -99.193)
 LANCE/SCIEMEX - Morelia, Mich., MX Updated: 2017/10/04-23:25 UTC

Figura 34: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo de 05 al 11 de Octubre del 2015. Fuente: LANCE/SCIEMEX, 2017.

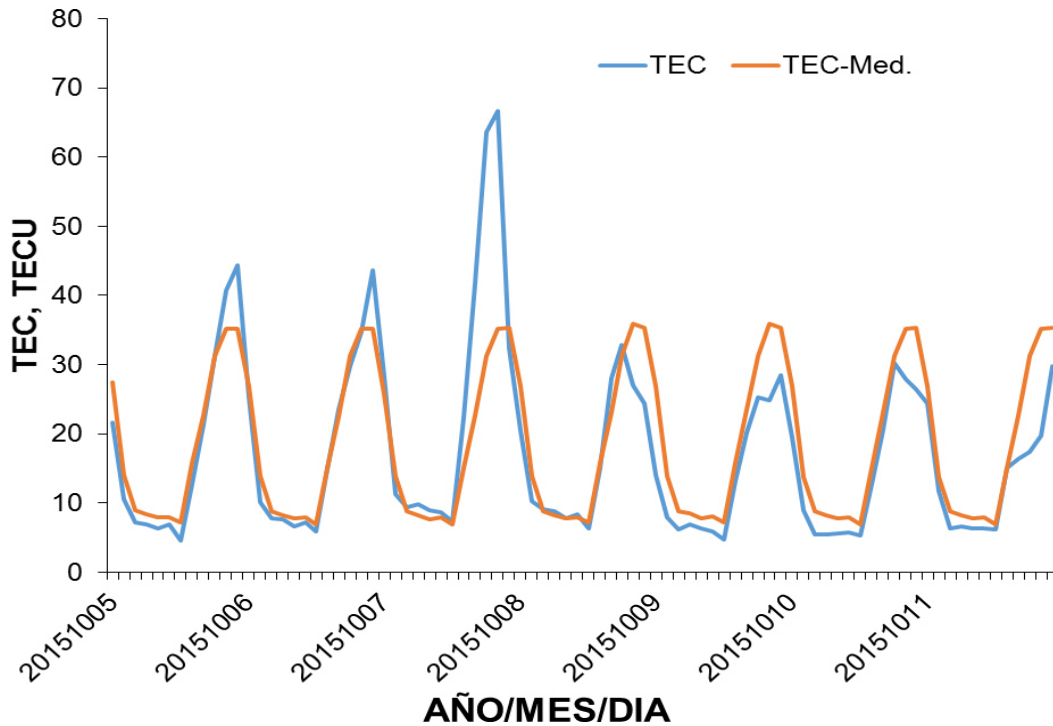


Figura 35: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALO-CNet (Aguas calientes).

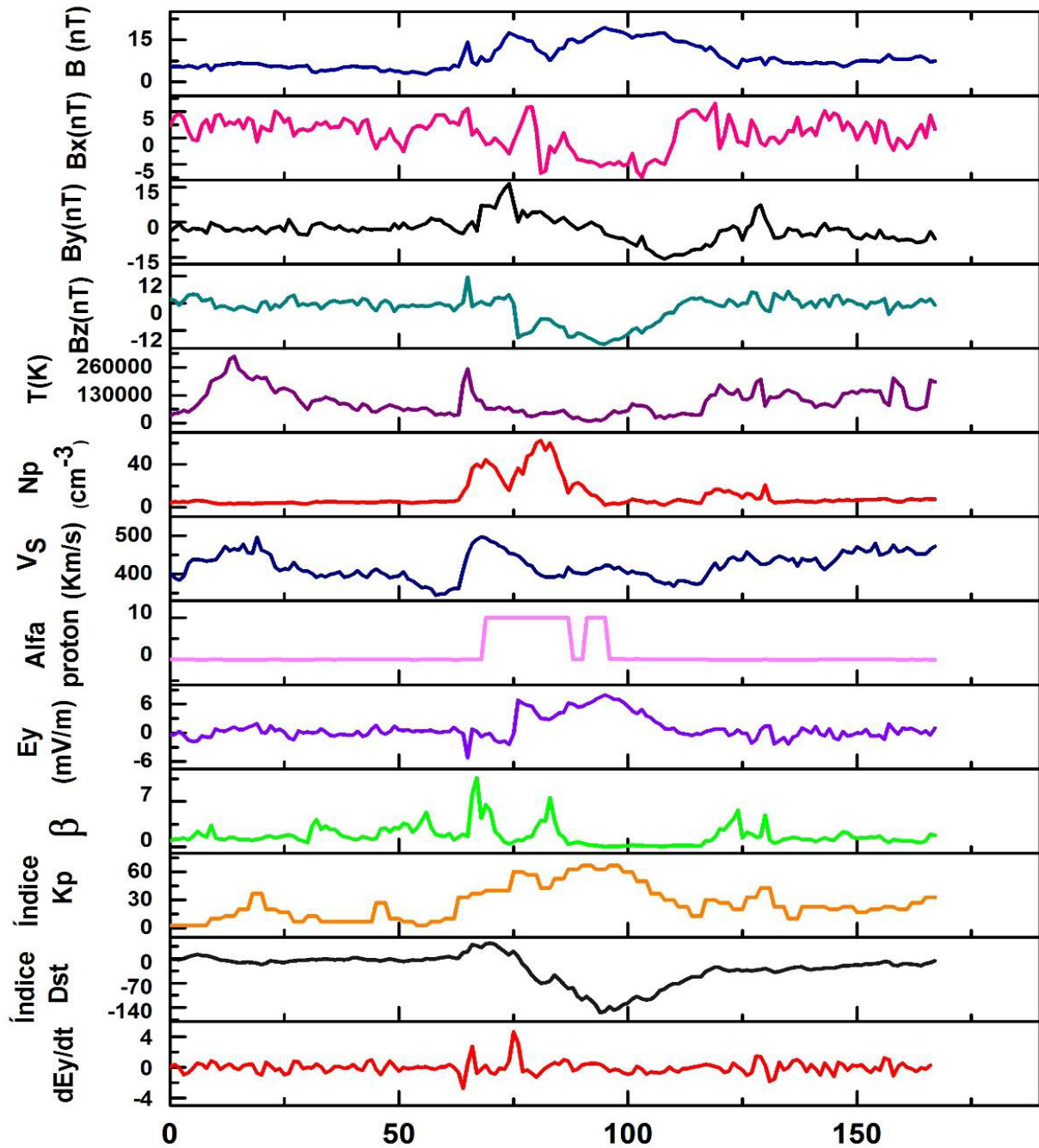
- Evento 4: Diciembre 20151219

El día 19 de Diciembre del 2015 en índice Dst se consideró como un día tranquilo durante las primeras 0 a - 6nT, las últimas 8 horas se presentaron variaciones positivas de 16 a 43 nT a lo que representa una compresión sobre la magnetosfera y a las primeras horas del día 20 de Diciembre presenta decremento que se observa en la gráfica, esto se debe a la perturbación ionosférica que se presentó el 19 de Diciembre el cual se mantiene en negativa hasta la primeras horas del día 21 de Diciembre. Durante la tormenta geomagnética su valor asciende y decreciente en cuestión de horas desde cero hasta el mínimo valor y comienza a recuperarse hasta alcanzar el valor inicial próximo a cero. A medida a que el índice Dst es más negativo, más intensa es la tormenta magnética.

En tanto nuestro campo magnético se observan ascensos y descensos ante el arribo de fuertes corrientes de protones, la componente Bz se observa más hacia el norte durante un impulso súbito como se observa en la gráfica.

Para el primer evento. Los índices regionales incrementaron, tanto delta H y el K regional mexicano.

Días antes de la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre, se observa un cambio abrupto en la velocidad y temperatura se incrementan y la densidad de protones decrece. Cabe resaltar que el valor máxima alcanzado en Dst fue en relación a Bz sur registrado como se muestra en los paneles de la gráfica .En cada índice que se observa hubo una variación significativa con respecto al campo magnético Bz en un periodo normal después que registra la variación de Bz.



Diciembre 2015

Figura 36: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 17 al 23 de Diciembre 2015. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (B, Bx, By, Bz), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos Kp y Dst, y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 17/12/2015 a las 23.00 horas de 23/12/2015.

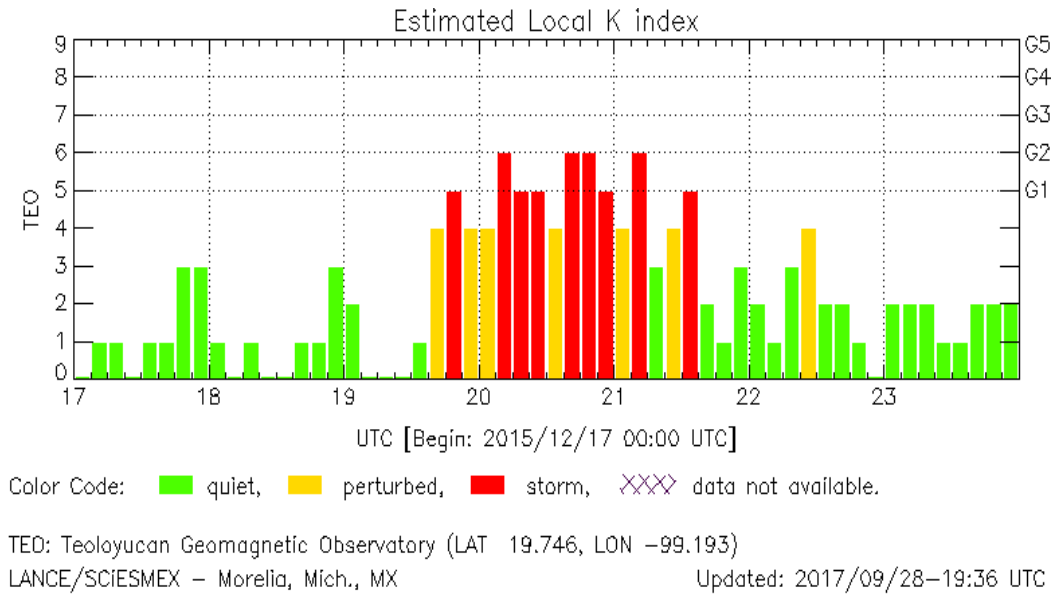


Figura 37: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex, para el periodo del 17 al 23 de Diciembre del 2015. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

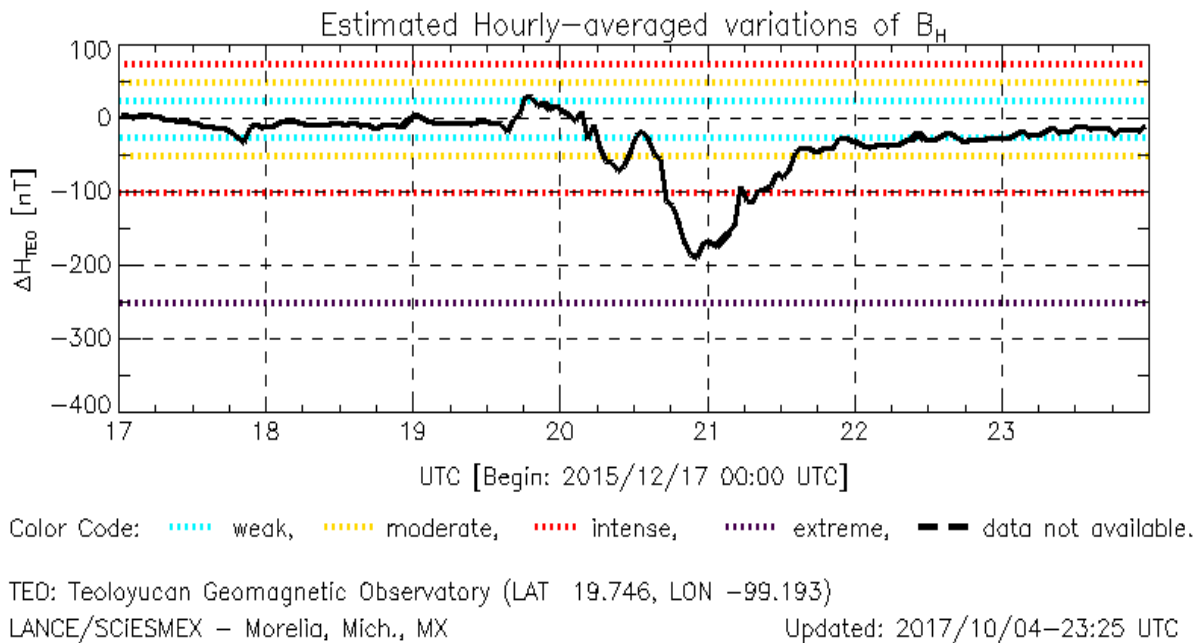


Figura 38: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo de 17 al 23 de Diciembre del 2015. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

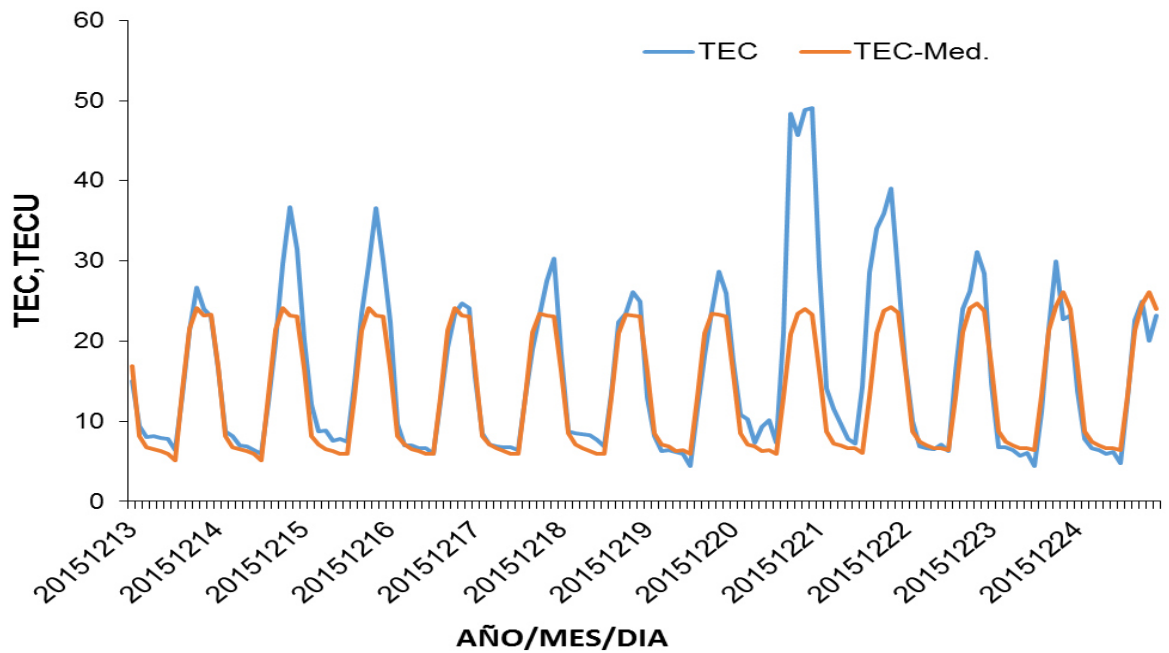


Figura 39: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALOCNet (Aguas calientes).

- Evento 6: Octubre 20161013

En este evento se presenta debido al arribo de una tormenta geomagnética ocasionada por una región de interacción. Las regiones de interacciones que golpean al campo geomagnético terrestre en cuales se derivan las tormentas intensas esta provienen de la fuerte interacción del plasma y el campo geomagnético. Además la ionosfera también puede verse afectada por estos fenómenos debido al aumento y disminución de la ionización plasmática. Por lo que la respuesta de la ionosfera durante la tormenta moderada se asocia a un evento de alta velocidad ocurrida durante la fase decreciente de la actividad solar del ciclo 24 en el 2016. En la cual se puede visualizar en la figura 43, el aumento durante el pico principal de la tormenta geomagnética.

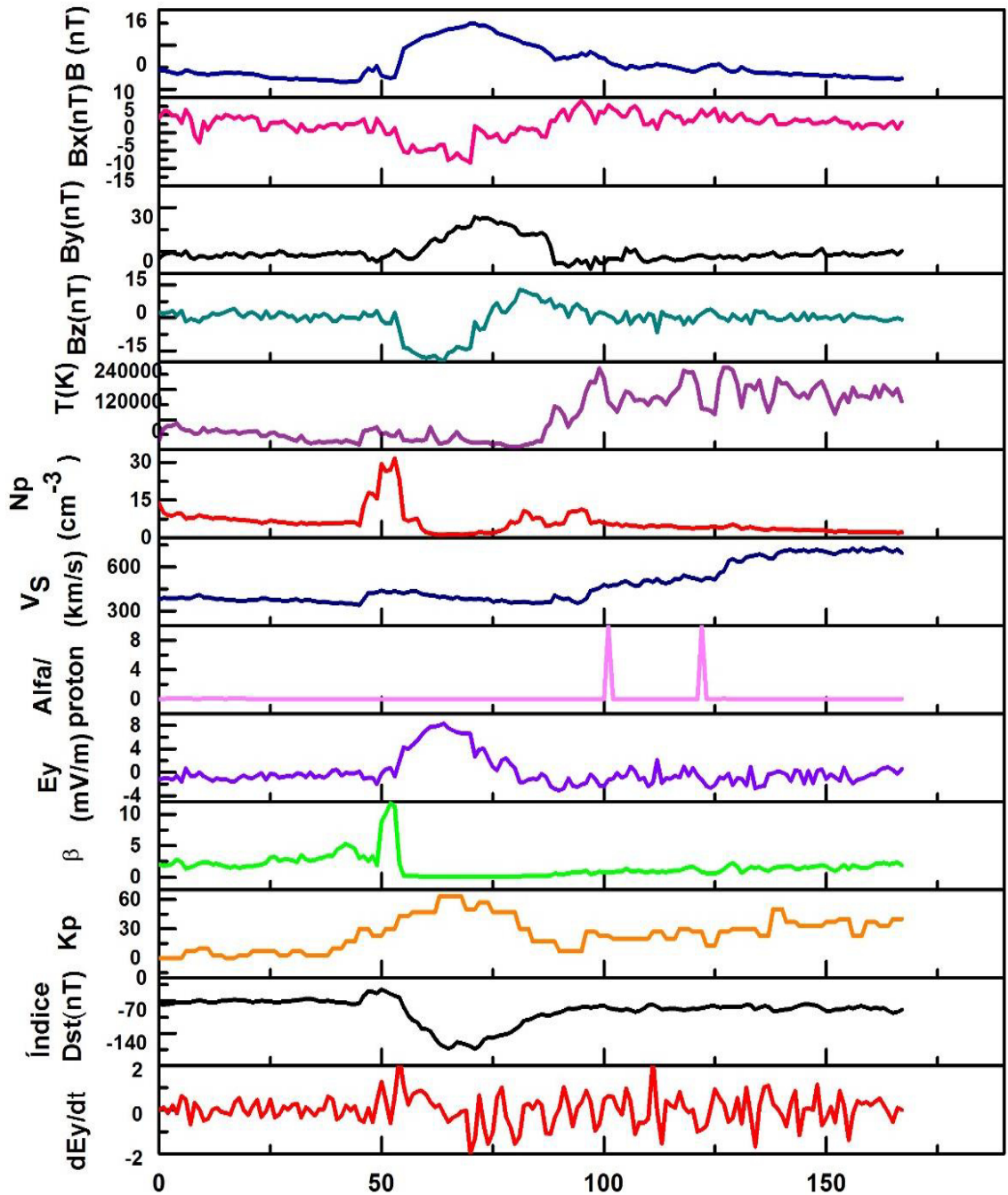
Además se observa los desfases de la temperatura debido a una región de interacción de corriente, la cual genero la tormenta geomagnética del 13 de Octubre del 2016.

En la figura 43, muestra los paneles de las variaciones de los parámetros del viento solar y variaciones del índice geomagnético así como índices regionales además del índice TEC que mide la perturbación de ionosfera a altitudes medias. El índice Kp indica que la intensidad de las variaciones del campo magnético terrestre a lo cual el campo magnético se presentó estable hasta el 12 de octubre a las 21 horas. Alrededor de las 3 horas del 13 de octubre el índice Kp alcanzo valores de 4 e incrementando hasta 5, debido a la tormenta geomagnética.

El índice Dst mide las variaciones de la componente horizontal del campo geomagnético. Estas variaciones por lo general, se deben al ingreso de partículas anómalas al ambiente espacial terrestre provocando eventos del clima espacial. Estas partículas energéticas penetran al campo magnético de la Tierra afectando los componentes electrónicos de los satélites que orbitan el planeta.

La variabilidad del índice Dst muestra perturbaciones de mediciones normales hasta el 13 de Octubre alrededor de las primeras horas, donde se observa la caída en la intensidad del índice alcanzando a los -94nT.

En los paneles de la siguiente figura se observa la variación de los componentes del campo magnético, como se observa en los paneles arriba un frente de choque provocado por una CIR a las 21:15:37 horas.



Octubre 2016

Figura 40: Mediciones in-situ del viento solar, parámetros derivados e índices planetarios de actividad geomagnética durante el 11 al 16 de Octubre 2016. De arriba abajo se muestran: el campo magnético (B , B_x , B_y , B_z), temperatura y densidad de protones, magnitud de la velocidad, proporción de partículas alfa, campo eléctrico, la beta del plasma, los índices geomagnéticos K_p y Dst , y la variación temporal del campo eléctrico inducido. La resolución de los datos es de 1 hora, e inician a partir de las 0:00 horas del día 11/10/2016 a las 23.00 horas

El índice Kmex indica la intensidad de variaciones del campo magnético terrestre a escala planetaria con intervalos de 3 horas.

En las gráficas 41 se observa una tormenta geomagnética durante los días 13 con un Kmex 6 y el 14 con Kmex 5, solo 2 días se mantuvo perturbado, pues los siguientes días se observan días tranquilos.

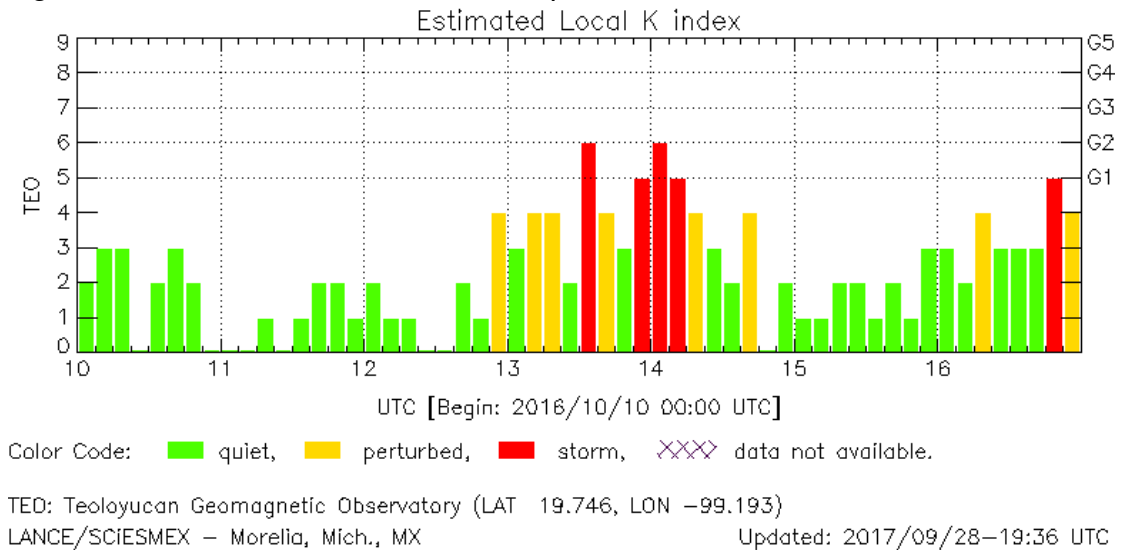


Figura 41: Valores del índice de actividad geomagnética regional Kmex para el periodo del 10 al 16 Octubre del 2016. Fuente: LANCE/SCIESMEX, 2017.

En la figura 42, se visualiza el decremento del índice DELTA H, mide las variaciones temporales de la componente horizontal. Estas variaciones se deben al ingreso de partículas anómalas al ambiente espacial terrestre. Durante la tormenta geomagnética la DELTA H muestra una perturbación intensa durante los días 13 y 14 de octubre el día 13 el índice alcanzo alrededor de -103nT por lo que se cataloga una tormenta intensa.

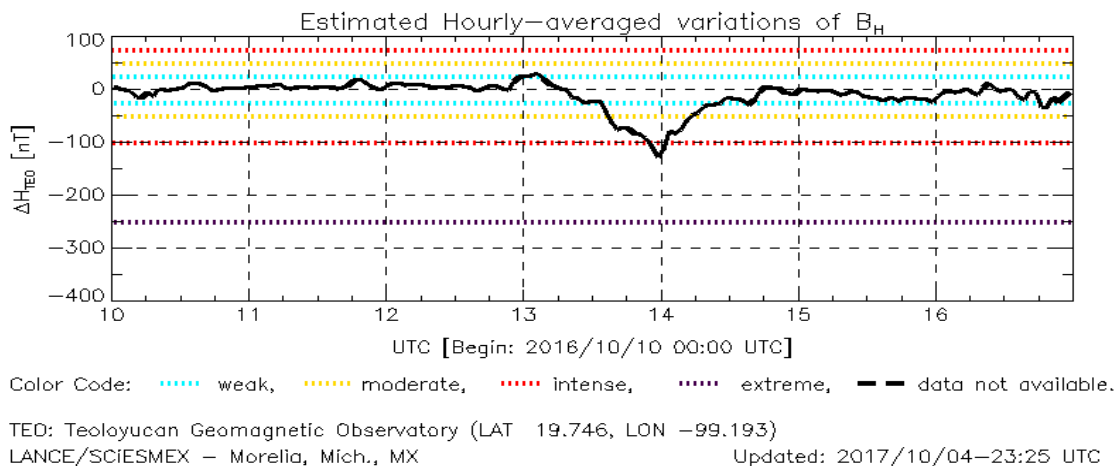


Figura 42: Valores del índice de actividad geomagnética regional DELTA H para el periodo del 10 al 16 Octubre del 2016. Fuente: LANCE/SCIESMEX,

Además en la gráfica TEC, se observa que incrementó el doble del TECmed puesto que el mayor impacto ocurrió el día 13 durante las 13 -17 hora local de México.

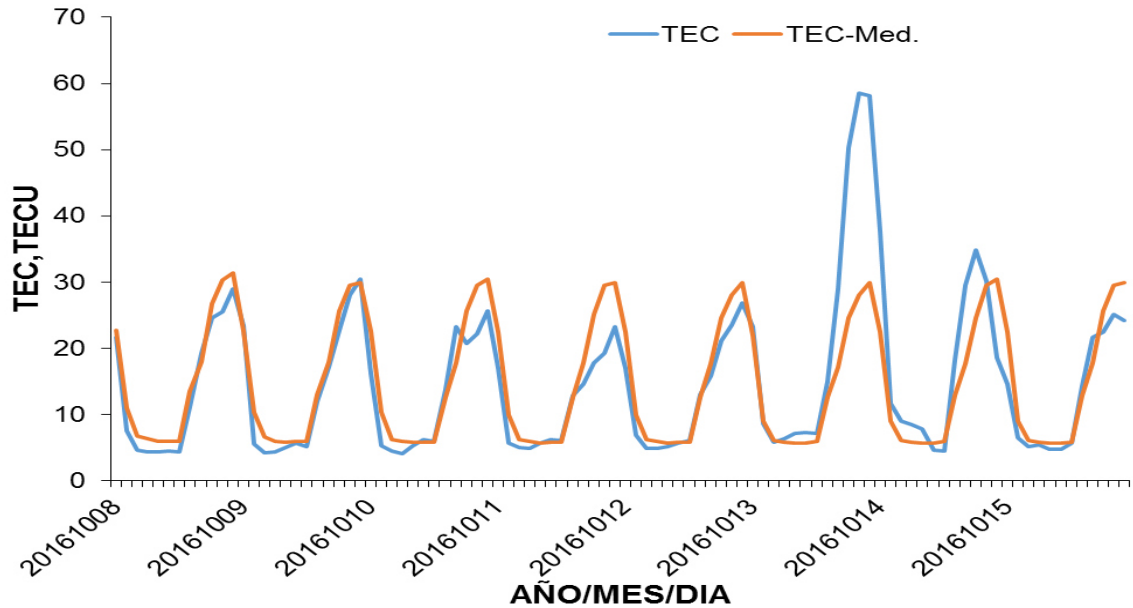


Figura 43: Contenido Total de Electrones (TEC) y mediana de 27 días previo (TEC-MED) calculados a partir de los datos de la estación local UCOE TLALO-CNet (Aguas calientes).

3.2 Efectos Regionales

Los efectos ocasionados en los eventos que analizamos fueron mínimas salvo el 17 de Marzo del 2015 y el 06 de Septiembre del 2017, ocasionando fallas de energía eléctrica y el GPS, además en el evento de Septiembre del 2017 se pudo apreciar luces en la atmósfera a lo que se puede deducir que fueron ocasionados por la intensidad de las partículas energéticas de radiación que impactaron en la atmósfera terrestre o ocasionando los relámpagos o sprites como lo menciona (Davis & Johnson, 2005).

Para los eventos posteriores no hay interferencias, ya que no se han presentado emisiones de consideración en la región como es México debido a que a latitudes medias no hay efectos de consideración ya que hasta el momento no se ha presentado un evento de gran magnitud como el "evento de Carrington de 1859", ya que estudios de muestran que se observaron auroras boreales en México.

Adicionalmente, las perturbaciones ionosféricas deterioran las radiocomunicaciones y sistemas basados en radiofrecuencias en tierra. Las tormentas geomagnéticas tienen el potencial de perturbar redes eléctricas, comunicaciones, navegación GPS, viajes aéreos, operaciones satelitales y vuelos espaciales tripulados.

4 DISCUSIÓN

En esta tesis se ha analizado el comportamiento de los eventos de las tormentas geomagnéticas que ocurrieron durante la fase descendente del ciclo solar número 24, con fechas del 17 de Marzo del 2015 al 06 de Septiembre del 2017 en un lapso de tres años. La razón por el cual se llevó a cabo la elección de los eventos fue por considerar la intensidad de perturbación en magnetosfera terrestre. Además, el análisis del TEC y de los índices geomagnéticos regionales con el fin de medir el grado de perturbación sobre la ionosfera de nuestro país, durante el periodo de la fase descendente del ciclo solar 24. El fin de este estudio es ver si existe una relación de eventos solares a medianas latitudes sobre la ionosfera (para México) y si fuera así bajo qué condiciones se presentaron dichas perturbaciones. Para ello se consideraron un total de siete eventos solares cuatro de los siete fueron ocasionados por una explosión seguida de una Eyección de Mas Coronal (EMC) y las otras tres fueron por una región de interacción de corriente (RIC) de viento lento con viento rápido lo que originó una tormenta geomagnética a lo cual ocasiono una perturbación del campo geomagnético terrestre.

Además, se hace una comparación del comportamiento del TEC sobre las estaciones del GPS mexicanas con los índices geomagnéticos Kmex y dH.

En los eventos analizados las estaciones utilizadas para el cálculo del TEC presentaron fluctuaciones en el comportamiento a lo cual es representativo de las perturbaciones ionosféricas 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 de los aumentos de la densidad de plasma causan compresión en la magnetosfera provocando impulsos repentinos (Echer et al., 2005); (Tsurutani et al., 2008); (Richardson et al., 2006); (Zhang et al., 2007) quienes relacionan las componentes Bz del campo magnético del medio interplanetario que conducen a una tormenta geomagnética.

El evento que muestran mayor incremento es el de Marzo 17 del 2015 con 77 TECu más de lo usual que corresponde a días quietos este evento con el de 6 de Marzo del 2016 el mayor incremento con 68 y 67 del TECu, con respecto a la comparación de los días quietos, ambos eventos muestran similitudes en el TEC ya que estos eventos ocurren en verano, de acuerdo a lo propuesto por Fuller-Rowell et al., 1996, quien argumenta que dichas disminuciones en el TEC, son producidas por mecanismos entre la ionosfera y termosfera, como cambios en la composición neutra y vientos troposféricos que pueden causar variaciones en el TEC.

El clima espacial tiene un impacto gradual en todas las latitudes, observándose los efectos más importantes en latitudes altas, además existe una considerable

influencia de las ráfagas solares y de las tormentas geomagnéticas relacionadas con las EMC y con las CIR. Sin embargo estos efectos perturban al comportamiento del contenido total de electrones para México.

En el análisis realizado muestra que los eventos principales relacionados Sol-Tierra tuvieron lugar en la fase descendente del ciclo solar 24. Las tormentas geomagnéticas más intensa se observó cerca del mínimo solar, por ejemplo la tormenta geomagnética más intensa del 17 de Marzo de 2015 conocida como la "tormenta del día de San Patricio" con un Dst -222 nT (Kamide & Kusano,2015); (Kataoka et al., 2015) observaron que esta tormenta se intensificó por la interacción de una CME y seguido de un flujo de alta velocidad poco antes de que llegara la Tierra.

Aunque las condiciones interplanetarias fueron bastantes fuertes e inestables en comparación con la fase principal, el parámetro interplanetario como el viento solar, la Bz y la componente del campo eléctrico interplanetario (Ey) se incrementó significativamente durante el periodo de la tormenta geomagnética TG (Park et al.,2015).

Una tormenta geomagnética es el resultado de las fuertes interacciones entre las partículas provenientes del Sol y la magnetosfera. En trabajos de González et al., 1994 muestra que la velocidad del viento solar, el campo magnético interplanetario hacia la Bz sur y la duración del Bz tiene efectos mayores en la magnetosfera terrestre provocando tormentas geomagnéticas intensas.

En todos los eventos el aumento y decremento del índice Dst está acompañado por picos en los valores de la densidad y velocidad del viento solar, está asociado con el arribo de estructuras de gran escala (CME O RIC) y de acuerdo con Kennel et al., 1995, esto provoca una compresión que se manifiesta en el aumento del índice Dst. Ya que en particular este índice pareciera responder a los aumentos de la densidad en el medio interplanetario. Por ejemplo en el evento de Marzo del 2015 y el Dst se muestra perturbado con valores altos durante los días 17 y 18 lo que coincide con el periodo de alta densidad en el viento solar. El pico máximo del Dst coincide con un aumento en la velocidad.

Para los eventos de Junio 22 del 2015, Marzo 06 del 2016 y Septiembre 09 del 2017, cuando el índice Dst presenta valores positivos coincide con el pico de la densidad y con un aumento en la velocidad, pero el valor máximo se observa unas horas después, También se observa un incremento en el campo eléctrico, además del índice geomagnético terrestre.

En cuanto al comportamiento de la ionosfera de los eventos seleccionados de Junio, Diciembre 2015 Octubre 2016 y Septiembre 2017 se visualiza que el momento que ocurre la disminución en el TEC el campo magnético interplanetario se observa que la componente Bx toma valores negativos y la componente By toma valores positivos. Para los eventos de Marzo, Octubre del 2015 y Marzo 2016 la configuración se presenta con Bx positivo y By negativo, por lo tanto en

la ionosfera se observa que el TEC responde a estos cambios ya que justo al ocurrir la segunda configuración Bx (+) y By (-) es cuando el valor del TEC se incrementa hasta más 58 TECu. Los resultados corroboran que los eventos presentan las condiciones favorables para la penetración del viento solar en la magnetosfera de la Tierra, a lo cual se presenta una compresión seguida de las tormentas geomagnéticas, a pesar de que los eventos analizados se presentaron en la fase descendente del ciclo solar 24 los incrementos que sufre la ionosfera al entrar en contacto las partículas provenientes del Sol, esto varía su concentración de electrones a con secuencia de los abruptos cambios a lo que demuestra que las perturbaciones están relacionadas con la orientación del campo magnético interplanetario que llega a la Tierra.

5 CONCLUSIONES

En este estudio se trabajó con 7 perturbaciones geomagnéticas del periodo 2015-2017 con datos de los observatorios que se encuentran distribuidos latitudinalmente en América y los satélites ubicados en el medio interplanetario Debido a que la Tierra se encuentra sumergido en el constante flujo del viento solar. La actividad solar juega un papel en la dinámica del plasma ionosférico de nuestro planeta. Para el clima espacial es muy importante estudiar la actividad del Sol. Nuestros estudios muestran las perturbaciones de la ionosfera y del campo magnético y como afecta al ambiente espacial terrestre (Liu et al., 2000). Esta perturbación se ha manifestado a partir de distintos análisis de los fenómenos como la disminución del campo eléctrico (Silva et al., 2011), la perturbación de las ondas de radio de baja frecuencia (Saha et al., 2014), anomalías en el TEC (Nenovski et al.,) y la variación en la densidad (Shen et al., 2015).

Como se observa en los eventos analizados el incremento del índice Dst y dH, en el viento solar el cual no tener las características necesarias para la penetración en la Bz sur causa una compresión en la magnetosfera y se manifiesta en el aumento del Dst. En los eventos se encontró el incremento del TEC durante la fase principal de la tormenta geomagnética. De acuerdo a los resultados la componente del medio interplanetario responsable de la penetración es la Bz y las componente Bx y By influyen en el tipo de perturbación debido a la penetración del campo eléctrico asociado (Tsurutani et al., 2008).

Las condiciones del viento solar influyen en el comportamiento de ionosfera. Se encontró una posible relación entre las condiciones del viento solar y los índices regionales mexicanos debido a la orientación del campo magnético.

En resumen se identificó el tipo de evento que provocó el inicio de la tormenta geomagnética y conocer los efectos de estos eventos usando los índices regionales mexicanos, además de correlacionar los efectos en la ionosfera con los datos TEC a las que analizamos.

Finalmente y lo más importante es que estos efectos se observa la gran magnitud de una tormenta geomagnética afectando a los sistemas satelitales que genera una gran repercusión, ya que nuestro planeta está en constante interacción con las partículas energéticas provenientes del Sol.

REFERENCIAS

Anderson, D. T. Fuller-Rowell (1999): The Ionosphere, Space Environment Topics (NOAA), SE-14.

Arnold Hanslmeier, (2007). The Sun and Space Weather (Astrophysics and Space Science Library) Segunda edición, Springer.

Baker, D.N., Lanzerotti, L.J., (2016). Space weather. Am. J. Phys. 84.DOI: 10.1119/1.4938403.

Baker, D.N., et al., (2008). Severe Space Weather Events - Understanding Societal and Economic Impacts Workshop Report. National Research Council Technical Report. ISBN 0-309-12770-X.

Blanco Cano, Xochitl y Kajdic, Primoz (2009). "El sol, nuestra estrella". Revista digital Universitaria (en línea). (Consultada: 2 de Febrero del 2018). Disponible en Internet: [<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art67/art67.pdf>].

Boteler, D.H., Pirjola, R., Nevanlinna, H., (1998). The effects of geomagnetic disturbances on electrical Systems at the Earth's surface, Adv. Space Res., 22.

Buonsanto, M.J. (1999). "Ionospheric storms. A review" Space Science Review, 88.DOI:10.1023/A:1005107532631.

Cannon, P.S., (2013). Extreme space weather a report published by the UK royal academy of engineering. Space weather. 11, 138139. DOI:10.1002/swe.20032.

Chen, P.F. (2011). Coronal mass ejection: models and their observational basis, Living Rev. Solar Phys, 8.

Chian, A. C.-L. & Kamide, Y. (2007). An Overview of the Solar-Terrestrial Environment, ed. Springer, 1-539.

Chiu, A. C.-L. & Kamide, Y. (2007). An Overview of the solar - Terrestrial Environment, ed. Springer, 1-539.

Christian R.E. (2012). Coronal Mass Ejections. NASA. Retrieved 9 July 2013), circulation model with coupled electrodynamics, Geophys. Res. Lett, 19,601-604.

Dal Lago, L.E.A. Vieira, E. Echer, W.D Gonzales, A. L. Clúa de Gonzales, F. L. Guarnieri, L. Balmaceda, J. Santos, M. R. Silva, A de Lucas, and N. J. Schuch.(2004). Great geomagnetic storms in the rise and maximum of solar cycle 23. *Brazilian Journal of Physics*, 34.

E. Romero-Hernandez, J.A. Gonzalez-Esparza, M. Rodriguez-Martinez, M.A. Sergeeva, E. Aguilar-Rodriguez, J.C. Mejia-Ambriz, V. De la Luz,(2017). Study of ionospheric disturbances over Mexico associated with transient space weather events. *Advances in Space Research*, 60. DOI: 10.1016/j.asr.2017.060.042.

Echer, E., W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, and A. L. C. Gonzalez (2008), Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst = -100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006). *J Geophys. Res.*, 113. DOI: 10.1029/2007JA012744.

Echer E, Gonzalez W.D, Tsurutani BT (2011) Statistical studies of geomagnetic storms with peak $Dst \leq -50$ nT from 1957 to 2008. *J Atmos Sol Terr Phys* 73. DOI:10.1016/j.jastp.2011.04.21.

Feldman U., Landi E. and Schwadron N.A. (2005). *On the Sources of Fast and Slow Solar Wind*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **110**, DOI:10.1029/2004JA010918

Feynman, J., & S. B. Gabriel (2000), On space weather consequences and predictions, *J. Geophys. Res.*, 105. DOI:10.1029/1999JA000141.

González-Esparza, J.A.,(2000). Introducción de Gran Escala del Medio Interplanetario. Comunicación técnica, Instituto de Geofísica, UNAM.

González-Esparza, J. A.,(1999) “Geometry and radial width of interaction regions”, *Solar Wind Nine*.

González-Esparza, J. A.(2000). “Solar-cycle variations of interaction regions: in-ecliptic observations from 1 to 5 AU”, *Geofísica Internacional*, 39.

Gonzalez-Esparza, J. A.; De la Luz, V.; Corona-Romero, P.; Mejia-Ambriz, J. C.; Gonzalez, L. X.; Sergeeva, M. A.; Romero-Hernandez, E. and Aguilar-Rodriguez, E. (2017). Mexican Space Weather Service (SCiESMEX) , *Space Weather*, 15. DOI: 10.1002/2016SW001496.

Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99 .

Gopalswamy, N., Yashiro, S., Xie, H., Akiyama, S., Mäkelä, P.,(2010). Large geomagnetic storms associated with limb halo coronal mass ejections. *Adv. Geosci. Solar Terr.* **21**, 71. ADS.

Gosling, J.T. y Pizzo, V. J. (1999). "Formation and evolution of corotating interaction regions and their threedimensional structure", *Space Science Reviews*, Springer.DOI:10.1023/A:1005291711900.

Gurnett, D. A. & Bhattacharjee, A. (2005).Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Application. Cambridge University Press, Primera edición.

Hathaway, David H. (2015). The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12. DOI 10.1007/lrsp-2015-4.

Harra, L.; Milligan, R.; Fleck, B.(2008) "Hinode: source of the slow solar wind and superhot flares". ESA.

Horne, R.B., Glauert, S.A., Meredith, N.P., Boscher, D., Maget, V., Heynderickx, D., Pitchford, D., (2013). Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST. *Space weather.* 11.DOI: 10.1002/swe.20023.

Horne, R.B., Pitchford, D., (2015). Space weather concerns for all-electric propulsion satellites. *Space weather.* 13.DOI:10.1002/2015SW001198.

Kelley, M.C. (2009). *The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics* Elsevier.

Kelly,M.N., (2009): "The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics". Cornell University collage of Engineering School of Electrical and Computer Engineering, Ithaca, NY.

Kelley, Michael C., (1989) "The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics," Academic Press.

Kintner, P.M., Coster, A.J., Fuller-Rowell, T., Mannucci, A.J., Mendillo, M., & Heelis, R. (2008). *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbance*. American Geophysical Union.

Kono, M. (Ed.) (2009): *Treatise on Geophysics: Geomagnetism*, Elsevier, 5

Lanza, R., Meloni A., (2006). *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists* Springer-Verlag.

Liu, Y.D., Yang, Z., Wang, R., Luhman, J.G., Richardson, J.D., Lugaz, N.: (2014). Sun-to-Earth Characteristics of Two Coronal Mass Ejections Interacting Near 1 AU: Formation of a Complex Ejecta and Generation of a Two-step Geomagnetic Storm. *Astrophys. J. Lett.* 793, L41. DOI: 10.1088/2041-8205/793/2/L41

Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press, segunda edición.

Meyer-Vernet, N. (2012). *Basics of the Solar Wind*. Cambridge University Press. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012bsw..book.....M>.

Merrill R. T., McElhinny W., McFadden, Phillip L., (1996) "The magnetic Field of the Earth". Academic press.

Ontiveros V. & Gonzales-Esparza, J.A., (2010). Geomagnetic storms caused by shocks and ICMES. *Journal of Geophysical Research*, 115. DOI: 10.1029/2010JA015471.

Otaola, J.A., Mendoza B., Pérez R., (1999): *El Sol y la Tierra, Una Relación Tormentosa*, Fondo de Cultura Económica, La Ciencia para Todos, 114.

Priest, E., (2014), *Magnetohydrodynamics of the Sun*, Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9781139020732.

Richmond, A. D., Ridley, E.C., Roble, R.G., (1992). A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics. *Advancing earth and space science*, 19 .DOI:10.1029/92GL00401.

Rodríguez- M. M., Pérez-Enríquez, H. R., Carrillo-Vargas, A., López-Montes, R., Araujo-Pradere, E. A., Casillas-P, G. A., & Cruz-Abeyro, L. A., (2014). Ionospheric

disturbances and their impact on IPS using MEXART observations. *Solar Physics*, 289. DOI: 10.1007/s11207-014-0496-8

Rozelot, J. P. & Lefebvre, S. (2006). *Solar and Heliospheric Origins of Space Weather Phenomena*, Lecture Notes in Physics. Springer Berlin Heidelberg, 699. DOI: 10.1007/B11429173.

Saha, K. (2008): *The Earth's Atmosphere. Its Physics and Dynamics*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

Svalgaard L. (2013). *Solar Activity-Past, Present and Future*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3. DOI:10.1051/swsc/2013046.

Tandber-H.E., & Emslie, A.G. (1988). *The Physics of solar flares*. Cambridge University Press 14.

Tascione, F. Thomas.(1998) "Introduction to the Space Environment " Krieger Publishing Company. Second Edition.

Tsurutani, B. T., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., Lakhina, G.S., Li, G., & Zank, G.P.(2009). A brief review of solar flare effects on the ionosphere. *Radio Science*, 44. DOI: 10.1029/2008RS004029.

Wilson R. P. (2005) *Solar and Stellar Activity Cycles*. Cambridge Astrophysics Series. Press, 24,

Webb, D. F. & Howard, T. A. (2012). *Coronal Mass Ejections: Observations*, Living Reviews in Solar Physics. Disponible en línea: (<http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-3>). Accesado el día 20 Enero del 2018.

Watari S., Kato H., Yamamoto K., (2015). Hit rate of space weather forecasts of the Japanese forecast center and analysis of problematic events on the forecasts between June 2014 and March 2015. *Sun Geosph* 10(2):163–171

Yashiro, S., N. Gopalswamy., G. Michalek., O.C. St Cyr., S.P. Plunkett., N.B. Rich., y R. A. Howard., 2004, *J. Geophys. Res.*, 109, 07105

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., Zhukov,

A.N,(2007). Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms (Dst < -100 nT) during 1996 – 2005. *J. Geophys. Res*,112DOI: 10.1029/2007JA012321.