



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS
“MAT. LUIS MANUEL RIVERA GUTIERREZ”

“ANÁLISIS DE PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS
UTILIZANDO EL CÓDIGO USTEC,
DURANTE EL CICLO SOLAR 23”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

PRESENTA:

VÍCTOR HUGO MÉNDEZ BEDOLLA

vhmendezbedolla@gmail.com
0617394A

ASESORES:

DR. MARIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

mrodriguez@enesmorelia.unam.mx

DR. FRANCISCO SIDDHARTHA GUZMÁN MURILLO

guzman@ifm.umich.mx

Morelia Michoacán, enero de 2017

”Solo somos una raza avanzada de primates en un planeta menor de una estrella ordinaria. Pero podemos entender el universo. Y eso nos hace muy especiales”.

-Stephen Hawking

Índice general

Introducción	XVII
1 Plasmas Espaciales	1
1.1 ¿Qué es un Plasma?	1
1.1.1 Grado de Ionización	2
1.1.2 La Esfera de Debye	2
1.1.3 Condiciones de un Plasma	3
1.1.4 Tipos de Plasmas	4
1.2 El Sol	5
1.2.1 Viento Solar	6
1.2.2 Interacción Viento Solar-Tierra	8
1.3 Actividad Solar	11
1.3.1 Ráfagas Solares o <i>Flares</i>	11
1.3.2 Eyecciones de Masa Coronal (EMC)	12
1.3.3 Manchas Solares	14
1.3.4 Ciclo de Manchas Solares	15
1.4 Tormenta Geomagnética o TG	17
1.4.1 Índice Dst	17
1.4.2 Fases de una Tormenta Geomagnética	18
1.5 Ionosfera Terrestre	19
1.5.1 Estructura Ionosférica	20
1.5.2 Características de la Ionosfera	21
1.6 Motivación de esta Tesis	22
2 Estudio del Clima Espacial	23
2.1 ¿Qué es el Clima Espacial?	23
2.1.1 ¿Cuáles son sus efectos en la Tierra?	23
2.2 Perturbaciones Ionosféricas (PI)	24
2.2.1 Variaciones Regulares	25
2.2.2 Variaciones Irregulares	25
2.3 Tormenta Ionosférica	26
2.3.1 Índice W	26
2.4 El Ciclo Solar 23	27
2.5 Catálogo de Ráfagas Solares	28
2.6 Catálogo de EMC	28
2.7 Selección de Eventos Solares	30
2.7.1 Selección de EMC	31
2.7.2 Selección de Ráfagas Solares	32
2.8 Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y su aplicación para la ionosfera	32

2.9	Formato RINEX	33
2.10	Cálculo del Contenido Total de Electrones o TEC	34
2.11	Método de Wavelets en el lenguaje IDL	36
3	USTEC	39
3.1	Código e Instalación	39
3.2	Interfaz <i>gmagic</i>	40
3.2.1	Filtro Kalman	41
3.3	Interfaz <i>gplot</i>	42
3.4	Archivos ASCII	43
3.5	Mapeo TEC	44
4	Análisis y Resultados	47
4.1	Tormentas Geomagnéticas durante el año 2002	47
4.1.1	Evento No.1: 20 de abril de 2002	48
4.1.2	Evento No.2: 11 de mayo de 2002	50
4.1.3	Evento No.3: 23 de mayo de 2002	51
4.1.4	Evento No.4: 21 de agosto de 2002	53
4.1.5	Evento No.5: 4 de septiembre de 2002	54
4.1.6	Evento No.6: 8 de septiembre de 2002	56
4.1.7	Evento No.7: 1 de octubre de 2002	57
4.1.8	Evento No.8: 21 de noviembre de 2002	59
4.2	Tormentas Geomagnéticas durante el año 2003	60
4.2.1	Evento No.9: 29 de mayo de 2003	61
4.2.2	Evento No.10: 18 de junio de 2003	63
4.2.3	Evento No.11: 18 de agosto de 2003	64
4.2.4	Evento No.12: 30 de octubre de 2003	66
4.2.5	Evento No.13: 20 de noviembre de 2003	69
4.3	Tormentas Geomagnéticas durante el año 2004	70
4.3.1	Evento No.14: 22 de enero de 2004	70
4.3.2	Evento No.15: 4 de abril de 2004	72
4.3.3	Evento No.16: 27 de julio de 2004	73
4.3.4	Evento No.17:30 de agosto de 2004	75
4.3.5	Evento No.18: 8 de noviembre de 2004	76
4.4	Comparación de eventos	78
5	Conclusiones	81
5.1	Trabajo a Futuro	83
	Apéndice	85
	Bibliografía	105
		105

Lista de Figuras

1.1	Diferentes tipos de plasmas en función de la temperatura y la densidad. <i>Tomado de: National Research Content, (1995)</i>	4
1.2	Representación de la interacción entre la heliósfera, el viento solar y medio interestelar. <i>Adaptado de: Eastman E. T. (1990)</i>	6
1.3	<i>Izquierda:</i> Diagrama de la espiral de Parker y el ángulo promedio $\theta \approx 45^\circ$ debido a la tasa de rotación ecuatorial solar de 24.5 días. <i>Derecha:</i> Vista tridimensional de la hoja de corriente neutra. <i>Cortesía de: S.-I. Akasofu, Geophysical Institute, University of Alaska.</i>	7
1.4	Diagrama de un dipolo magnético y sus líneas de campo hacia el vacío. <i>Tomado de: Kelley M. C. (2009).</i>	8
1.5	<i>Panel a)</i> Formación de una magnetósfera cerrada a causa de un viento solar subsónico. <i>panel b)</i> Interacción del viento solar supersónico y la magnetósfera. <i>Tomado de: Kelley M. C. (2009).</i>	9
1.6	Principales regiones de plasma formadas dentro de la magnetósfera. <i>Obra original de: William Crochot-NASA.</i>	10
1.7	Fotografía tomada por NASA'S <i>Solar Dynamics Observatory</i> (SDO) del extremo de luz ultravioleta (131 Angstrom) y la región activa donde ocurrieron más de 12 ráfagas solares entre el 8 y 10 de octubre de 2012. <i>Fuente:</i> http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/potw/item/378	11
1.8	Perfil de una EMC justo antes de un choque interplanetario junto con la variación del viento solar y su campo magnético. <i>Tomado de: Lang K. R. (2009)</i>	12
1.9	Fotografía tomada por NASA'S <i>Solar Dynamics Observatory</i> (SDO) de un EMC detectado el día 26 de septiembre de 2014. El material expulsado es Helio ionizado a 60,000°C. <i>Fuente:</i> http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/potw/item/562	13
1.10	Fotografías tomadas para la misma EMC vista a través de LASCO el día 19 de abril de 2012: <i>Fotografías superiores:</i> CME capturado por LASCO C2, <i>Fotografías inferiores:</i> CME capturado por LASCO C3. <i>Tomado de SOHO NASCOM Gallery.</i>	14
1.11	Gráfica de las manchas solares anuales desde 1818 con datos obtenidos de NASA's <i>Ames Research Center en California.</i>	15
1.12	Distribución espacial de las manchas solares conocida como diagrama mariposa. <i>Tomado de: Solanki et al., (2008)</i>	16
1.13	Descripción gráfica del movimiento de las manchas solares sobre la corteza. <i>Tomado de: Pearson Prentice Hall, Inc. (2005).</i>	16
1.14	Gráfica de las tres diferentes fases de una tormenta geomagnética. <i>Datos tomados de Dst Kyoto.</i>	18
1.15	Proceso de reconexión magnética durante una tormenta geomagnética. <i>Tomado de: Tsurutani et al., (2003)</i>	19

1.16	<i>Izquierda:</i> Perfil de la atmósfera neutra y su variabilidad térmica. <i>Derecha:</i> Perfil para la densidad eléctrica de un gas ionizado tanto para el día como para la noche. <i>Tomado de:</i> (Kelley M. C. (2009))	20
2.1	Tiempo aproximado de arribo (en escala logarítmica) para diferentes casos de actividad solar. Las letras blancas son los eventos solares, las amarillas son los efectos observables sobre la Tierra. <i>Tomado de:</i> Knipp et al., (2016)	24
2.2	Manchas solares mensuales durante el Ciclo Solar 23 con datos obtenidos de <i>SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels.</i>	28
2.3	Rango de datos analizados del Catálogo SOHO LASCO CME.	29
2.4	Tabla ilustrativa de los valores contenidos del catálogo de EMC obtenidos de la base de datos de SOHO LASCO.	30
2.5	Histograma del total de EMC y EMC tipo Halo para cada uno de los años de estudio.	32
2.6	Ejemplo de la estructura del formato RINEX.	34
2.7	Modelo ionosférico de capa delgada y su relación con sTEC vs vTEC. Tomada de: http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php	36
2.8	Mapa del TEC sobre la región centro y norte de América generado por el software <i>gmagic</i> durante la tormenta de <i>Halloween.</i>	36
2.9	Ejemplo de cada uno de los paneles producidos por medio de la rutina del método de <i>wavelets</i> en IDL.	38
3.1	Interfaz gráfica del programa <i>gmagic.</i>	40
3.2	Interfaz gráfica del programa <i>gplot.</i>	42
3.3	Ejemplo de la matriz bidimensional y sus valores TEC (multiplicados por diez) dados por longitud (renglón) y latitud (columna) creada por el programa <i>gplot.</i>	44
3.4	Mapa geográfico que muestra las coordenadas de ciudades a diferentes latitudes del territorio mexicano, así como de las coordenadas aproximadas tomadas del formato ASCII.	45
4.1	El panel <i>a)</i> indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b), c), d)</i> y <i>e)</i>) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #1 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	49
4.2	El panel <i>a)</i> indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b), c), d)</i> y <i>e)</i>) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #2 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	51
4.3	El panel <i>a)</i> indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b), c), d)</i> y <i>e)</i>) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #3 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	52
4.4	El panel <i>a)</i> indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b), c), d)</i> y <i>e)</i>) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #4 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	54
4.5	El panel <i>a)</i> indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b), c), d)</i> y <i>e)</i>) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #5 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	55

4.6	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #6 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	57
4.7	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #7 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	58
4.8	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #8 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	60
4.9	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #9 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	62
4.10	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #10 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	64
4.11	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #11 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	65
4.12	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC con datos cada 15 minutos para el evento #12 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	67
4.13	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC con datos cada 2 minutos para el evento #12 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	68
4.14	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #13 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	70
4.15	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #14 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	71
4.16	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #15 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	72
4.17	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #16 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	74

4.18	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #17 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	75
4.19	El panel <i>a</i>) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (<i>b</i>), <i>c</i>), <i>d</i>) y <i>e</i>)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #18 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.	77
4.20	Histograma en relación a la tabla 4.24 del valor Dst (mínimo) panel a), índice W (en valor absoluto) panel b), vTEC y mvTEC para las ciudades de Ensenada y Morelia respectivamente en el panel c) y d).	79
5.1	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #1 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.1.	86
5.2	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #2 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.2.	87
5.3	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #3 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.3.	88
5.4	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #4 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.4.	89
5.5	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #5 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.5.	90
5.6	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #6 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.6.	91
5.7	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #7 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.7.	92
5.8	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #8 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.8.	93
5.9	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #9 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.1.	94

5.10	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #10 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.2.	95
5.11	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #11 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.3.	96
5.12	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #12 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.4.	97
5.13	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #12 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 2 minutos. Más información en la sección 4.2.4.	98
5.14	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #13 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.5.	99
5.15	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #14 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.1.	100
5.16	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #15 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.2.	101
5.17	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #16 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.3.	102
5.18	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #17 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.4.	103
5.19	Método de <i>wavelets</i> aplicado al evento #18 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.5.	104

Lista de Tablas

1.1	Diferentes valores aproximados para los plasmas más comunes. <i>Tomado de: NRL plasma formulary (2013)</i>	5
1.2	Valores estadísticos del viento solar a 1 UA (<i>Tomado de: McFadden et al., (2006)</i>)	7
1.3	Clasificación de las TGs según su grado de perturbación sobre la ionosfera (González et al., (1999)).	17
2.1	Clasificación de una tormenta ionosférica según el índice W.	27
2.2	Tabla de las tormentas geomagnéticas con clasificación intensa y fuerte, durante el periodo 2002-2004.	31
3.1	Coordenadas geográficas de estaciones GPS mexicanas.	44
4.1	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de abril de 2002.	48
4.2	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 20 de abril de 2002.	48
4.3	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 11 de mayo de 2002.	50
4.4	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 23 de mayo de 2002.	51
4.5	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 23 de mayo de 2002.	52
4.6	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 21 de agosto de 2002.	53
4.7	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 21 de agosto de 2002.	53
4.8	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 4 de septiembre de 2002.	54
4.9	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 8 de septiembre de 2002.	56
4.10	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 29 de mayo de 2003.	61
4.11	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 29 de mayo de 2003.	61
4.12	EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas del 10 de junio de 2003.	63
4.13	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de las tormentas geomagnéticas del 10 de junio de 2003.	63
4.14	EMC asociada a la tormenta geomagnética del 18 de agosto de 2003.	64
4.15	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 18 de agosto de 2003.	65
4.16	EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas de octubre de 2003 conocida como tormenta de <i>Halloween</i>	66
4.17	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron en octubre de 2003 conocida como tormenta de <i>halloween</i>	66
4.18	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de noviembre de 2003.	69
4.19	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 22 de enero de 2004.	71

4.20	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 4 de abril de 2004.	72
4.21	EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 27 de julio de 2004.	73
4.22	Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 27 de julio de 2004.	73
4.23	EMC asociadas a las tormenta geomagnética del 8 de noviembre de 2004.	76
4.24	Tabla comparativa en unidades TEC entre los valores vTEC máximos/mínimos perturbados y su correspondiente mediana vTEC (mvTEC) para las ciudades Ensenada y Morelia durante el paso de la tormenta geomagnética.	78

Agradecimientos

A lo largo de mi vida he conocido personas muy significativas, tanto así que este trabajo va dedicado a todas ellas:

Para mi familia entera, por siempre apoyarme y hacer todo lo necesario para que nunca dejara mis estudios. Pero en especial a la persona que fue el pilar de mi familia y mi figura paterna durante la mayor parte de mi vida: mi abuelo Víctor.

A la facultad de Fis-Mat por formarme académicamente y prepararme para la siguiente etapa de mi vida. De la misma forma agradezco a todos los sinodales que han intervenido en la mejora de este trabajo y me apoyaron para que pudiera seguir cumpliendo mis sueños.

Expreso también mi completa admiración y agradecimiento a mi asesor de la UNAM el Dr. Mario Rodríguez Martínez por orientarme a cada momento y motivarme a continuar estudiando. Estoy en deuda con él por todo el apoyo recibido.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PA-PIIT) de la UNAM IA107116: Estudio de Perturbaciones Ionosféricas a latitudes intermedias a cargo del Dr. Mario Rodríguez Martínez. También a la DGAPA-UNAM por la beca recibida para el desarrollo de este trabajo. Así mismo agradezco al Laboratorio de Ciencias Geoespaciales (LACIGE) (<http://www.lacige.unam.mx/>) de la ENES unidad Morelia de la UNAM, por el apoyo recibido para desarrollar las diferentes corridas del código USTEC en sus servidores.

También quiero agradecer el apoyo recibido por parte del equipo técnico de la ENES unidad Morelia en cuanto a cómputo, infraestructura y telecomunicaciones, durante el desarrollo de esta tesis en el LACIGE. Particularmente quiero agradecer al M. C. Ulises Olivares Pinto, al Ing. Pablo Alfonso García Cruz y al Ing. Froylán Hernández Rendón.

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

Por último, a todos mis amigos de antaño, así como a los recientes con quienes he compartido buenos y malos momentos. A mi novia Estefania por contagiarme de amor, pasión y mucha locura. A Pedro Pacheco, ya que sin él nada de esto hubiera sido posible. Además de todas las personas que he conocido durante la realización de esta tesis.

Resumen

En esta investigación se presenta un estudio realizado sobre perturbaciones ionosféricas haciendo uso del código USTEC aplicado a datos de estaciones fijas de GPS sobre territorio mexicano. Dicho código permite calcular el contenido de electrones a lo largo de la vertical (vTEC por sus siglas en inglés) que se encuentra presente en la ionosfera terrestre. Este proceso se repitió para cada una de las 18 tormentas geomagnéticas intensas ($Dst < -100$ nT) ocurridas entre los años 2002 al 2004, pertenecientes al Ciclo Solar 23. Un análisis de wavelets posterior, que fue aplicado a estos datos de vTEC, permitió encontrar propiedades importantes de las perturbaciones ionosféricas observadas. De todas las tormentas analizadas, se encontró que la tormenta de Halloween (30 de octubre de 2003), provocó particularmente las perturbaciones ionosféricas más importantes de ese periodo. Este evento presentó una doble caída en los valores del índice Dst, -353 y -383 nT respectivamente, lo que provocó un cambio abrupto en el vTEC de hasta 260 unidades TEC ($1 uTEC = 10^{16} e/m^2$). Los análisis de wavelets, realizados en el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE, ENES unidad Morelia), muestran claramente los intervalos de tiempo donde ocurrieron los cambios de vTEC, así como las frecuencias asociadas a estas perturbaciones, que oscilaron en valores alrededor de 3.3, 4.9 y 10 Hz aproximadamente. Adicionalmente se calculó el índice W para cada uno de los eventos estudiados, el cual permite saber que tan perturbada estuvo la ionosfera. Particularmente se encontró un valor de hasta 0.88 para la tormenta de Halloween. Para el desarrollo de este trabajo, fue necesario observar el comportamiento de la ionosfera en varias regiones sobre el territorio mexicano. Por un lado se estudió el comportamiento de la ionosfera a latitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Monterrey, así como a latitudes cercanas a Morelia y Mérida. El trabajo resalta la importancia de dar continuidad al estudio de eventos intensos y el incorporar aquellos que tienen que ver con procesos energéticos por radiación del EUV y rayos X como parte de una investigación a futuro.

Palabras clave: plasmas, ionosfera, perturbaciones, wavelets, mapas.

Abstract

This work is about a research on ionospheric disturbances using the USTEC code with GPS data from ground stations around the Mexican territory. This code calculates the total electron content perpendicular to the ground standing route ($vTEC$) found on the ionosphere. The process was repeated for each of the 18 intense geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) occurred during the years 2002 to 2004 belonging to the 23 Solar Cycle. A wavelet analysis with the $vTEC$ data allowed to find important properties from the ionospheric disturbances observed. Among all the analyzed storms, it was found that the Halloween one (October 30 of 2003) caused the most important ionospheric disturbances of this period. This event presented a double negative value of -353 and -383 nT in the Dst index generating an abrupt change in the $vTEC$ up to 260 TEC units ($1 uTEC = 10^{16} e/m^2$). The wavelet analysis developed in the Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACIGE, from the ENES Morelia) clearly presents the time interval where such changes occurred as well as the associated frequencies (3.3, 4.9 and 10 Hz approximately). Additionally, the W ionospheric index calculation represents the perturbation degree on the ionosphere. For instance, a 0.88 value was found during the Halloween storm. Also, this research shows the ionospheric variability over some Mexican cities. On the one hand the ionospheric behavior at high latitudes like Ensenada and Monterrey and on the other hand low latitudes like Morelia and Mérida revealed the importance of this type of research as well as keep on working with energetic processes by EUV and X rays as a possible future study.

Introducción

La ionosfera terrestre, es una capa atmosférica localizada entre los 80 y 600 km de altura. En ella, la radiación del Extremo UltraVioleta (EUV) y los rayos X del Sol ioniza a sus átomos y moléculas creando una capa de iones y electrones libres (plasma). Se sabe que hay diversos fenómenos solares, tales como las fulguraciones en rayos X y en el EUV, cambios súbitos en el viento solar, tormentas geomagnéticas entre otros, que pueden afectarla. Sus efectos se hacen visibles de diversas formas, por ejemplo: localmente a grandes latitudes (latitudes muy al norte o al sur) se pueden observar las auroras boreales/australes. Por otra parte, aunque pareciera que sus efectos se hacen gradualmente menos notorios a latitudes bajas e intermedias, esto no siempre es así.

Como parte de la motivación de este trabajo, surgen las preguntas básicas que debemos tratar de responder y que son: ¿Cómo estudiar y caracterizar esas perturbaciones ionosféricas? ¿Cuáles son sus escalas temporales y espaciales? ¿Cómo se relacionan la cantidad de energía liberada en el evento solar cuantitativamente con los efectos ionosféricos observados? Gran parte de las respuestas pueden abordarse al estudiar el comportamiento (sobre la vertical) del Contenido Total de Electrones o $vTEC$ y su variación durante eventos solares geo-efectivos. Las técnicas aquí empleadas brindarán una forma simple pero interesante de abordar estos fenómenos.

Se abordarán 18 eventos de estudio que ocurrieron en el periodo del 2002 al 2004 correspondientes a la fase de descenso del ciclo solar 23. Así por ejemplo, en el mes octubre de 2003 tuvieron lugar dos fenómenos solares muy peculiares. Estos produjeron dos tormentas geomagnéticas el día 30 de octubre, donde el índice Dst (*Disturbance Storm Time*) tuvo una caída doble de $-353nT$ y $-383nT$ a las 01:00 y 23:00 horas (TU) respectivamente. Esto debido a una ráfaga solar clasificada como X17.2 a las 09:51 (TU) el día 28 de octubre, la cual estuvo acompañada de dos eyecciones de masa coronal, la primera con velocidad supersónica de $2459km/s$ y $2029km/s$ a las 11:30 y 20:54 horas (TU) respectivamente, ambas tipo Halo (potencialmente dirigida hacia la Tierra). Este tipo de tormentas, lejos de pensarse que afectaron solo a latitudes altas, también lo hicieron a latitudes intermedias como en las que se encuentra gran parte de nuestro país. Sin embargo, el poco estudio de estas y la cuantificación de los daños sobre territorio mexicano aún es escaso.

El eje central de esta tesis es estudiar el comportamiento de la ionosfera en varias fechas y a distintas latitudes mexicanas con datos GPS provenientes del programa construido por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), llamado USTEC. Estas perturbaciones están asociadas a diferentes tormentas geomagnéticas intensas ($Dst < -100nT$) ocurridas dentro del periodo 2002 al 2004. Para esto se utilizaron los datos de la actividad geomagnética y la actividad solar, así como valores TEC de la ionosfera sobre varias estaciones mexicanas de GPS. En total se encontraron 18 eventos que fueron analizados a lo largo de este trabajo.

La tesis está dividida en 5 capítulos y un apéndice. En el capítulo 1 se hace una descripción completa de los plasmas y las tres condiciones que debe cumplir este cuarto estado de la materia. Además de una breve descripción sobre la actividad solar y su interacción con la magnetósfera terrestre; tormentas geomagnéticas como producto de esta interacción. Por último, qué es y cómo se estructura la ionosfera terrestre. Después, en el capítulo 2, se habla sobre la importancia que tiene el estudio del clima espacial; específicamente el análisis de la variabilidad ionosférica mediante la aplicación de un índice ionosférico W a tormentas geomagnéticas del ciclo solar 23. Todo esto con ayuda del cálculo TEC y cómo es que el GPS interviene en su medición. Dentro del capítulo 3 se encuentra una breve guía de cómo fué que se logró descargar estos archivos ASCII para las distintas tormentas. Desde la correcta instalación del programa USTEC hasta los parámetros modificados dentro de las interfaces gráficas de *gmagic* y *gplot* en el lenguaje de programación de MatLab. A su vez se muestran los lugares del territorio mexicano que se escogieron para el análisis y cómo es que se pudieran elegir otros distintos a través del formato de salida. Posteriormente en el capítulo 4 se habla sobre las características generales de cada uno de los 18 eventos geomagnéticos, lo anterior mediante el uso de tablas de eventos solares relacionados como EMC tipo Halo, ráfagas intensas (tipo M y X) y gráficas generadas con los valores vTEC de coordenadas de cuatro ciudades mexicanas (Ensenada, Monterrey, Morelia y Mérida). Adicionalmente se presentan los resultados obtenidos por el método de *wavelets* (índice W, mediana vTEC, potencias, frecuencias y varianza promedio) para dos diferentes ciudades (Ensenada y Morelia). Las gráficas de este método pueden ser consultadas dentro del apéndice.

Capítulo 1

Plasmas Espaciales

Pese a la creencia popular de que el espacio entre el Sol y los planetas está vacío (carente de energía o materia) la ciencia nos demuestra lo contrario. El Sol por ejemplo emite constantemente *plasma*¹, el cuarto estado de la materia, el cual se mueve en todas direcciones y a grandes velocidades llenando así el sistema solar entero.

Estudiando los procesos que ocurren ya sea en la magnetósfera terrestre, en el medio interplanetario o incluso alrededor de los planetas, será posible comprender la importancia que juegan los plasmas en nuestro universo. Es por eso que en este primer capítulo se definirá lo que es un plasma y se abordarán aspectos específicos en algunos de los más importantes para el clima espacial, tales como el plasma en el medio interplanetario, el Sol y la ionosfera terrestre.

1.1. ¿Qué es un Plasma?

Se comenzará definiendo este cuarto estado de la materia, el cual se forma cuando la temperatura de un gas es lo suficientemente alta como para que los átomos y moléculas que lo componen permanezcan ionizados y sus electrones sean liberados a causa de las colisiones producidas por la excitación térmica de las partículas. Cuando esto sucede, el comportamiento dinámico del gas puede estar sujeto a fuerzas electromagnéticas que actúan sobre los iones y electrones *libres* que lo conforman, esto cambia por completo sus propiedades de gas común, volviéndolo plasma, cuyo término denota el estado de un gas completamente ionizado (Thompson W. B. (1964)). Este estado ionizado tiene la propiedad de *cuasineutralidad* que significa un número equivalente de cargas positivas y negativas ($n_e \approx n_i$) por unidad de volumen.

Cabe mencionar que se le considera libre a una partícula, cuando ésta no entra en contacto directo con otra cercana, es decir, siempre que su energía cinética sea mucho mayor a la energía potencial (Baumjohann & Treumann (1996)). Esta energía solo se logra con magnitudes arriba de los eV , es por eso que los plasmas existen en mayor cantidad en cuerpos astronómicos, donde las temperaturas alcanzan los millones de grados, a diferencia de los laboratorios en tierra (Chen F. F. (1984)). Todo lo anterior puede ser explicado también mediante el grado de ionización.

¹Este nombre fue dado por Irving Langmuir en 1920, ganador del premio Nobel de Química en 1932.

1.1.1. Grado de Ionización

La cantidad o grado de ionización de un plasma está dada en función de la temperatura y la densidad de sus iones y electrones. Así, un nivel bajo de ionización significa un sistema parcialmente ionizado, mientras que un nivel alto; un gas completamente ionizado. Para calcular este valor en un gas térmico en equilibrio se utiliza la *ecuación de Saha*, la cual se escribe como:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/K_B T}, \quad (1.1)$$

donde n_i es la densidad de átomos ionizados y n_n la densidad de partículas neutras. Mientras que K_B es la constante de Boltzmann y U_i es la energía de ionización del gas. Esta ecuación representa la proporción de partículas ionizadas. Por ejemplo, al calcular el grado de ionización de un gas a nivel terrestre, donde la temperatura ambiente es $T = 300\text{ K}$ y $n_n = 3 \times 10^{25}\text{ m}^{-3}$ la densidad promedio de un espacio cualquiera y $U_i = 14.5\text{ eV}$ donde $1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$ (Chen F. F. (1984)). Sustituyendo estos valores en la ecuación (1.1) da como resultado:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 10^{-122},$$

donde se infiere que un gas en esas condiciones está muy lejos de poseer un grado suficiente de ionización como para ser considerado plasma.

A medida que la temperatura del gas aumenta, el grado de ionización no se ve afectado. Sin embargo, no es hasta que U_i es mayor que $K_B T$ cuando el grado aumenta repentinamente y el gas se convierte en un plasma. También lo hace eventualmente para valores aún mas altos de T y de n_n .

Así pues, un bajo grado de ionización representa que la colisión entre partículas neutras es dominante. Mientras que en un alto grado de ionización es la colisión de partículas cargadas las que dominan. El grado que determina el momento en que un gas se vuelve plasma puede variar entre los diferentes tipos de plasmas. Este valor puede ser del orden de 10^{-6} (Loucas G. et al., (2004)).

1.1.2. La Esfera de Debye

Para encontrar partículas libres en un sistema es necesario recurrir a un parámetro donde la fuerza de Coulomb de las partículas cercanas sea lo suficientemente pequeña tal que la cuasi-neutralidad del medio se conserve. La construcción de este parámetro es posible a través de una superficie cerrada llamada *esfera de Debye*.

Esta superficie debe contener un volumen con un suficiente número de partículas dentro, pero aún así, suficientemente pequeño comparado con las longitudes características para variaciones de parámetros macroscópicos tales como la densidad y la temperatura. En cada elemento microscópico de volumen, el campo de las cargas debe cancelarse para poder proveer una carga macroscópica neutra (Baumjohann & Treumann (1996)). Así pues, existen tres condiciones necesarias para que el sistema pueda considerarse como plasma.

1.1.3. Condiciones de un Plasma

Al considerar, para cada carga q en el sistema, su potencial de Coulomb:

$$V = \frac{q}{Kr} \quad (1.2)$$

Siendo el valor $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ conocido como la constante de permitividad eléctrica² e introducimos un nuevo parámetro dentro del potencial:

$$\phi_D = \frac{q}{Kr} \exp\left[\frac{-r}{\lambda_D}\right] \quad (1.3)$$

Ahora ϕ_D es la energía potencial, donde la función exponencial interrumpe el potencial para $r > \lambda_D$. Esta λ_D es precisamente la *longitud de Debye* del radio de una esfera cuyo balance entre energías cinéticas y potenciales existe dentro de ella, de tal manera que la cuasineutralidad se cumple.

Esta longitud de Debye es también definida a través de la densidad y temperatura de los electrones T_e , que deben ser iguales a la de los iones

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K_B T_e}{n_e e^2}}, \quad (1.4)$$

Una vez definida esta longitud, es posible formular la primera condición: La cual nos dice que la magnitud L del sistema tiene que ser inmensamente grande comparada con el radio de la esfera λ_D . Esto con la finalidad de garantizar un suficiente número de partículas dentro de ella.

Primera condición:

$$\frac{\lambda_D}{L} \ll 1.$$

Otra ecuación más se deriva de la propiedad intrínseca de la esfera de Debye y su relación con la densidad de sus electrones:

$$N_D = \frac{4\pi\lambda_D^3}{3} n_e, \quad (1.5)$$

donde el valor $n_e \lambda_D^3$ es llamado *parámetro del plasma* con el cual es posible construir la segunda condición la cual describe que dentro de la esfera de Debye debe existir un gran número de partículas.

Segunda condición:

$$\Lambda = n_e \lambda_D^3 \gg 1.$$

²También conocida como constante de fuerza de Coulomb, expresa la atracción entre dos cargas unitarias en el vacío (Hector & Schultz (1936)).

Una tercera condición se desprende de la colisión entre partículas. Estos sucesivos choques entre cargas producen también una ionización en cadena, que a su vez generan una corriente eléctrica y por tanto un campo magnético. Como resultado de esto, los electrones liberados en la ionización pueden ser acelerados por campos electromagnéticos externos, ganando así energía cinética. A este movimiento se le conoce como frecuencia típica de oscilación ω_{pe} y está descrita por la ecuación:

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}. \quad (1.6)$$

Finalmente, si consideramos este parámetro ω_{pe} entre dos partículas contenidas dentro de la esfera y la variable τ_n que denota un intervalo de tiempo donde los electrones permanecen libres (sin colisionar) es posible formular la tercera y última de las condiciones:

Tercera condición:

$$\omega_{pe} \tau_n \gg 1.$$

La cual enuncia que para que los electrones permanezcan invulnerables a las colisiones, este valor τ_n debe ser mucho más grande que la frecuencia.

1.1.4. Tipos de Plasmas

Una pieza clave en el estudio de los plasmas es su clasificación. La figura 1.1, muestra una clasificación general de los plasmas que existen en el universo, algunos de ellos incluso, pueden ser creados en un laboratorio bajo condiciones especiales. Todos estos plasmas cumplen con las tres condiciones anteriores. Además, relaciona los distintos valores característicos de un plasma, tales como: la densidad de electrones N_D , la temperatura T_e , así como la energía térmica $k_B T$. Particularmente la figura 1.1 muestra el plasma solar, entre algunos otros también importantes para este trabajo y que serán descritos más adelante.

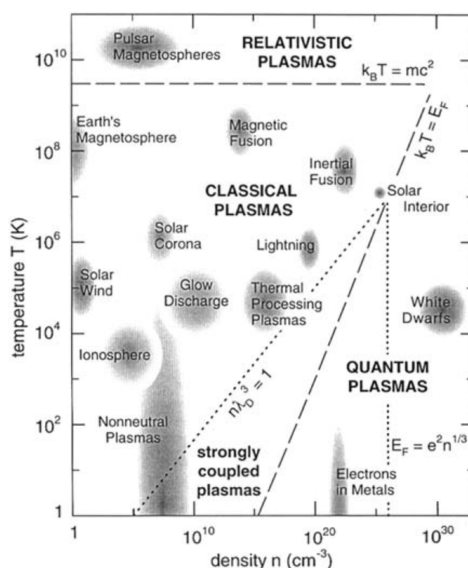


Figura 1.1: Diferentes tipos de plasmas en función de la temperatura y la densidad. Tomado de: *National Research Content*, (1995)

1.2. El Sol

Ya que la temperatura en su núcleo oscila alrededor de los $15 \times 10^6 K$ lo vuelve un gas totalmente ionizado ($\frac{n_i}{n_n} \approx 1$) (Delobea F. and Lesh J. (1971)), capaz de emitir $3.826 \times 10^{33} \text{ erg}$ de energía. La tabla 1.1 muestra algunas de las magnitudes para los plasmas más comunes. Diversas propiedades de los plasmas pueden ser observadas en esta tabla, en la que incluso sus parámetros físicos pueden cambiar dependiendo de su densidad y temperatura.

En el Sol pueden ocurrir diversos fenómenos tales como: Eyecciones de Masa Coronal (EMC), viento solar rápido y lento, entre otros. Todos estos fenómenos tienen propiedades de plasma diferentes y serán descritos en las siguientes secciones.

Plasma Type	$n [cm^{-3}]$	$T [eV]$	$\omega_{pe} [sec^{-1}]$	$\lambda_D [cm]$	$n\lambda_D^3$	$v_{ei} [sec^{-1}]$
Interstellar gas	1	1	6×10^4	7×10^2	4×10^8	7×10^{-5}
Gaseous nebula	10^3	1	2×10^6	20	8×10^6	6×10^{-2}
Solar Corona	10^9	10^2	2×10^9	2×10^{-1}	8×10^6	60
Diffuse hot plasma	10^{12}	10^2	6×10^{10}	7×10^{-3}	4×10^5	40
Solar atmosphere	10^{14}	1	6×10^{11}	7×10^{-5}	40	2×10^9
Warm plasma	10^{14}	10	6×10^{11}	2×10^{-4}	8×10^2	10^7
Hot plasma	10^{14}	10^2	6×10^{11}	7×10^{-4}	4×10^4	4×10^6
Thermonuclear plasma	10^{15}	10^4	2×10^{12}	2×10^{-3}	8×10^6	5×10^4
Theta pinch	10^{16}	10^2	6×10^{12}	7×10^{-5}	4×10^3	3×10^8
Dense hot plasma	10^{18}	10^2	6×10^{13}	7×10^{-6}	4×10^2	2×10^{10}
Laser plasma	10^{20}	10^2	6×10^{14}	7×10^{-7}	40	2×10^{12}

Tabla 1.1: Diferentes valores aproximados para los plasmas más comunes. *Tomado de: NRL plasma formulary (2013)*

Algunas de las propiedades del Sol son: su radio $6.98 \times 10^{10} \text{ cm}$, su masa $1.989 \times 10^{33} \text{ g}$ y su distancia a la Tierra $1.5 \times 10^8 \text{ km}$, también conocida como 1 UA (Unidad Astronómica).

El Sol cuenta con una atmósfera que se divide en: fotosfera (zona ligada a la superficie), cromósfera (zona intermedia) y corona solar (región externa). El ancho de la fotosfera es de 500 km seguida de la cromósfera que tiene un espesor de aproximadamente 2500 km hasta la corona solar la cual se extiende millones de kilómetros hacia el espacio³. Las temperaturas llegan a ser de $4.4 \times 10^3 \text{ K}$ y $6.6 \times 10^3 \text{ K}$ al final e inicio de la fotosfera respectivamente y de $1 \times 10^6 \text{ K}$ en la base de la corona (Williams, R. D. (2013)). Además, este astro radía su luz en una amplia gama de longitudes de onda del espectro electromagnético hacia el exterior y de forma perpendicular a su superficie a través del medio interplanetario, además de partículas altamente energéticas a velocidades entre los 300 y 1400 km/s , también conocido como *viento solar*⁴. Este viento viaja e interactúa con todos los objetos del Sistema Solar, hasta la frontera conocida como *heliopausa* mientras que la región encerrada por ésta, se le conoce como la *heliósfera* (ver figura 1.2). Se estima que esta última región se localiza alrededor de las 122 UA (Webber & McDonald (2013)).

³Esta corona solar puede observarse a través de un coronógrafo o a simple vista durante un eclipse solar.

⁴Este viento está compuesto de hasta un 5% de Helio y de algunos otros elementos químicos como el Carbono, Nitrógeno, Oxígeno, Neón, Magnesio, Silicon y Hierro ($\sim 1\%$),(Webber & McDonald (2013))

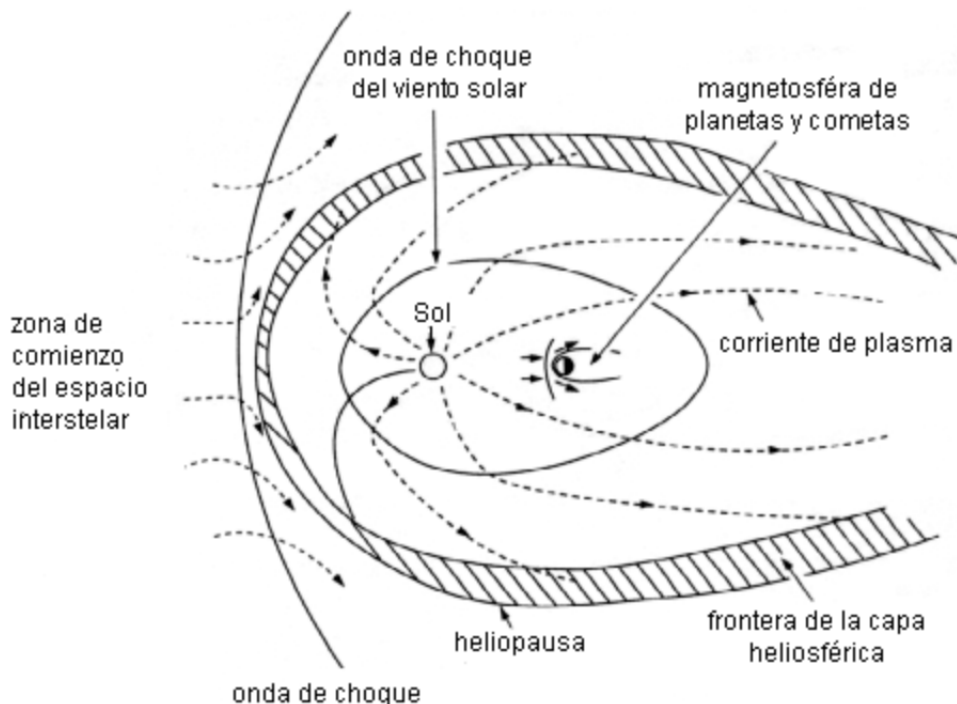


Figura 1.2: Representación de la interacción entre la heliosfera, el viento solar y medio interestelar. Adaptado de: Eastman E. T. (1990)

1.2.1. Viento Solar

La expansión radial y perpendicular a la superficie de la corona solar forma un flujo ininterrumpido de partículas cargadas eléctricamente llamado viento solar. Este plasma se puede pensar como aire excepto que es afectado por campos magnéticos. Estas partículas se encuentran atrapadas por la fuerza gravitatoria del Sol. Naturalmente, este viento solar calienta todo a su alrededor, interfiriendo sobre cualquier obstáculo que encuentre a su paso ya sea planeta, cometa, satélite o asteroide. Sin embargo, la interacción entre ambos dependerá del tipo de obstáculo y sus propiedades intrínsecas como el campo magnético.

Diversas misiones espaciales han calculado propiedades de este viento cerca de la Tierra. Valores como la densidad electrónica $n_e \approx 5 \text{ cm}^{-3}$ y la temperatura de este viento $T_e \approx 10^5 \text{ K}$ son sólo algunos de los parámetros determinados por dichas misiones. Cabe mencionar además que la magnitud del campo magnético interplanetario es del orden de $B_o = 5 \text{ nT}$ (Baumjohann & Treumann (1996)).

La figura 1.3 muestra el comportamiento de este viento solar y su interacción con las líneas del campo magnético a medida que se expande radialmente (ver fig. 1.3). A la rotación del campo magnético interplanetario o CMI se le llamó *espiral de Parker*⁵ que, vista en tres dimensiones tiene forma ondulada, similar al de una falda de bailarina al girar (ver figura 1.3). Durante la rotación, la Tierra queda por arriba y por debajo de la corriente. A esta superficie acanalada se le conoce como *hoja de corriente neutra*.

⁵Eugene Parker fue el físico espacial estadounidense que predijo y demostró la existencia del viento solar en 1958.

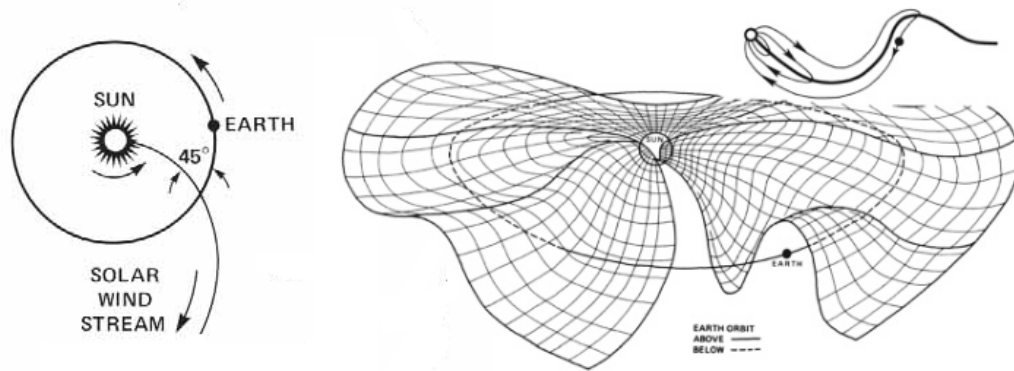


Figura 1.3: *Izquierda:* Diagrama de la espiral de Parker y el ángulo promedio $\theta \approx 45^\circ$ debido a la tasa de rotación ecuatorial solar de 24.5 días. *Derecha:* Vista tridimensional de la hoja de corriente neutra. *Cortesía de:* S.-I. Akasofu, *Geophysical Institute, University of Alaska.*

Existen dos tipos de viento solar y son clasificados en base a su velocidad: el viento solar *lento* con una velocidad promedio de 400 km/s , una temperatura de $1.5 \times 10^6 \text{ K}$ y que se origina comúnmente en la región ecuatorial del Sol conocida como anillo de corriente o *streamer belt*. Por el contrario, el viento solar *rápido* tiene una velocidad promedio de 750 km/s y una temperatura de $8 \times 10^5 \text{ K}$ el cual se origina en las manchas solares. 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)).

La tabla 1.2 contiene un resumen de algunas propiedades del viento solar a nivel estadístico, medidas desde el plano eclíptico a 1 UA a través de satélites.

Parámetro	Medio	σ	Probable	Mediana
$n[\text{cm}^{-3}]$	8.7	6.6	5.0	6.9
$V_{vs}[\text{km/s}]$	468	116	375	442
$B[nT]$	6.2	2.9	5.1	5.6
$A(HE)$	0.047	0.019	0.048	0.047
$T_p[\times 10^5 \text{ K}]$	1.2	0.9	0.5	0.95
$T_e[\times 10^5 \text{ K}]$	1.4	0.4	1.2	1.33
$T_\alpha[\times 10^5 \text{ K}]$	5.8	5.0	1.2	4.5
T_e/T_p	1.9	1.6	0.7	1.5
T_α/T_p	4.9	1.8	4.8	4.7
$nV_{vs}[\times 10^8 / \text{cm}^2 \text{ seg}]$	3.8	2.4	2.6	3.1
$V_s[\text{km/s}]$	63	15	59	61
$V_A[\text{km/s}]$	50	24	50	46

Tabla 1.2: Valores estadísticos del viento solar a 1 UA (Tomado de: McFadden et al., (2006))

- (σ) Desviación estandar.
- (n) Densidad de iones.
- (V_{vs}) Velocidad de flujo.
- (B) Intensidad de campo magnético.
- ($A(HE)$) Abundancia de partículas alfa respecto a protones.
- (T_p) Temperatura de protones.
- (T_e) Temperatura de electrones.

(T_α) Temperatura de partículas alfa.

(T_e/T_p) Razón de temperatura de electrones respecto a la de protones.

(T_α/T_p) Razón de temperatura de partículas alfa a la de protones.

(nV_{vs}) Número de flujo.

(V_s) Velocidad del sonido.

(V_A) Velocidad de Alfvén⁶.

1.2.2. Interacción Viento Solar-Tierra

Las partículas con carga eléctrica provenientes del Sol (en su viento solar) logran interactuar con la magnetósfera de la Tierra. Por tal motivo y para explicar su movimiento, se recurrirá a las líneas de campo magnético. La figura 1.4 muestra las líneas de campo de un dipolo, cuya ecuación en coordenadas esféricas, se ve como:

$$r = L \cos^2 \theta, \quad (1.7)$$

En el diagrama 1.4 r es medido en unidades del radio terrestre, L el radio de punto de cruce ecuatorial de la línea de campo y θ la latitud magnética con respecto al Ecuador solar. Además, el campo en la superficie varía desde 0.25×10^4 teslas donde su variación es de 0.6×10^{-4} teslas cerca del Ecuador.

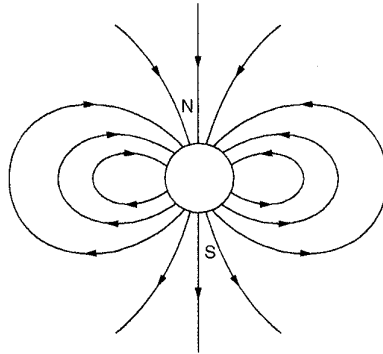


Figura 1.4: Diagrama de un dipolo magnético y sus líneas de campo hacia el vacío. Tomado de: Kelley M. C. (2009).

En una primera aproximación, se puede ignorar la naturaleza supersónica del viento solar y rodear la Tierra, así como su campo magnético, de plasma subsónico. Esto sin considerar el campo magnético interplanetario o CMI, de tal forma que la fuerza de Lorentz sobre una partícula de carga q que se desplaza a una velocidad \vec{V} está dada por la ecuación:

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} \quad (1.8)$$

Esta ecuación junto con la polaridad del campo terrestre predice la dirección de la fuerza con la que el viento solar será desviado (por un lado electrones y por el otro iones) a medida que su distancia hacia la Tierra es cada vez menor. Cuando a este escenario se le aumenta la interacción de estas partículas y el campo magnético secundario que generan al ser desviadas, la figura 1.5a

⁶Velocidad en la que las ondas hidromagnéticas pueden propagarse en un plasma magnéticamente dominado.

muestra la configuración resultante conocida como *magnetósfera cerrada*. Donde *magnetósfera* es el volumen encerrado por la región alargada y dominada por el campo magnético terrestre. El plasma contenido dentro de esta región es más caliente y denso que el viento mismo y la fuerza del campo magnético alcanza magnitudes mayores también. A la frontera que determina esta región se le llama *magnetopausa* la cual tiene mayor excentricidad sobre el lado opuesto al impacto del viento solar.

Esta distorsión en la parte exterior del dipolo terrestre, debida a la presión cinética del viento solar comprime el campo en la parte frontal del choque, mientras que en la parte trasera de este lo alarga, formando una *magnetocola o cola magnética* que abarca más allá de la órbita lunar.

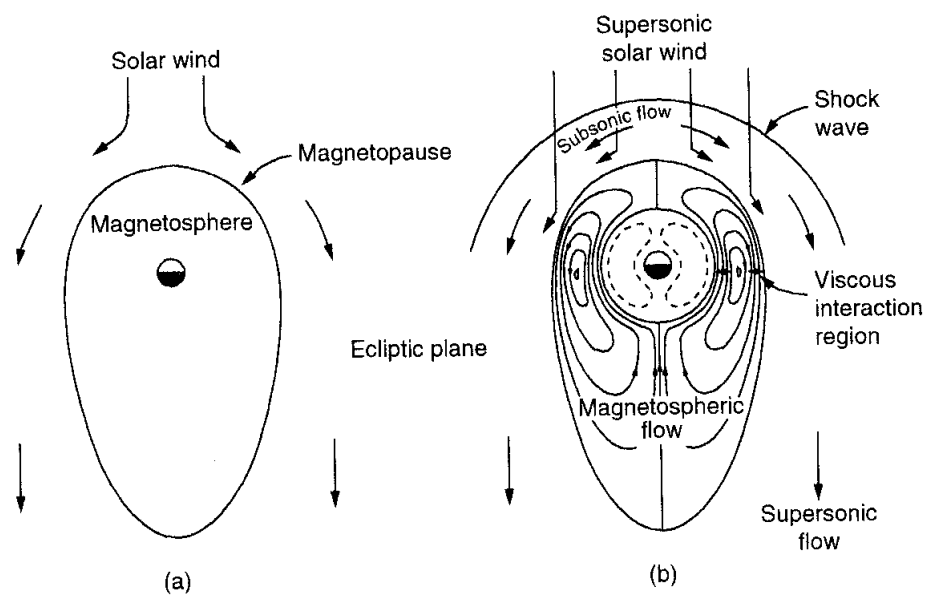


Figura 1.5: *Panel a)* Formación de una magnetósfera cerrada a causa de un viento solar subsónico. *panel b)* Interacción del viento solar supersónico y la magnetósfera. Tomado de: Kelley M. C. (2009).

Por otro lado, si se consideran las propiedades supersónicas del viento solar, el fenómeno queda mejor representado por la figura 1.5b donde adicionalmente aparece una región llamada *shock wave* o choque de proa (ver fig. 1.5b) el cual transfiere alguna de esa energía cinética K en energía térmica lo cual explica el aumento de densidad y temperatura y logra reducir la velocidad del viento solar volviendolo subsónico. En este nuevo diagrama existe plasma dentro de la magnetósfera muy cercano al borde y débilmente acoplado al flujo del viento solar. Cabe mencionar, que las ondas de choque también se pueden representar como discontinuidades formadas cuando la velocidad del flujo es más grande que la velocidad magnetosónica⁷ del viento solar V_{ms} donde $V_{ms}^2 = V_s^2 + V_A^2$. Siendo V_s la velocidad del sonido y V_A la velocidad de Alfvén⁸.

⁷Con propiedades magnéticas al igual que supersónicas.

⁸Velocidad a la que las perturbaciones de amplitud corta del campo magnético viajan en el plasma.

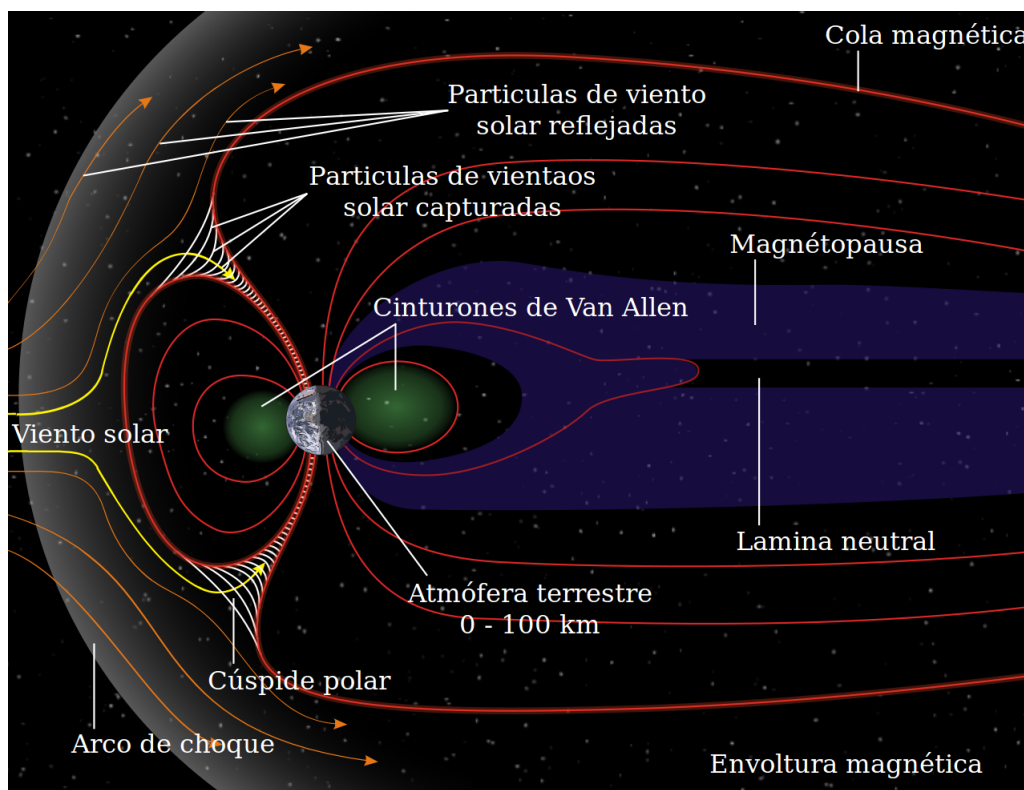


Figura 1.6: Principales regiones de plasma formadas dentro de la magnetósfera. *Obra original de: William Crochot-NASA.*

Es tanta la energía cinética de este viento solar que cuando logra impactar con el campo magnético dipolar terrestre, no sólo algunas de estas partículas logran penetrarlo a través de regiones de flujo llamadas *cúspides polares*, sino que la mayoría lo deforman formando de nueva cuenta una magnetósfera cerrada pero esta vez dinámica, donde la interacción es “viscosa” (Axford & Hines (1961)). El viento desviado alrededor de la magnetósfera se puede volver a encontrar tiempo después del choque, pero ahora, en la cola magnética. Parte del reencuentro de este plasma continúa su viaje por el espacio, mientras que otra parte regresa una vez más en dirección hacia la Tierra en un proceso también conocido como *reconexión magnética*.

Por otra parte, el conjunto de partículas atrapadas (iones y electrones) en el campo magnético forman un toroide alrededor de la Tierra. Este fenómeno fue descubierto por James Van Allen en 1958. Gracias a él se le conoce como *los cinturones de Van Allen* (ver figura 1.6).

La radiación existente en esta última región puede ser perjudicial tanto para la vida humana como para equipos tecnológicos que se encuentren cerca. Sin embargo, una manifestación clara e inofensiva son las aureolas boreales⁹, donde la ionosfera juega un papel fundamental en su formación.

⁹Las auroras boreales son producidas por la excitación de las partículas con el viento solar y que son arrastradas hasta las regiones polares debido al campo magnético terrestre.

1.3. Actividad Solar

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

1.3.1. Ráfagas Solares o *Flares*

Como parte de los eventos solares por radiación, se encuentran las ráfagas solares o *flares*, que son destellos luminosos sobre la corona solar, las cuáles abarcan un intervalo amplio de longitudes de onda del espectro electromagnético. La observación de este fenómeno solar fue hecha por primera vez por Richard Carrington el primero de septiembre de 1859 (Ashbrook J. (1984)). Desde entonces se ha tratado de observar al Sol continuamente a través de observatorios espaciales. Si algunos de estos destellos apuntara hacia la Tierra, le tomaría uno o dos días recorrer esa distancia (Menzel et al., (1970)).

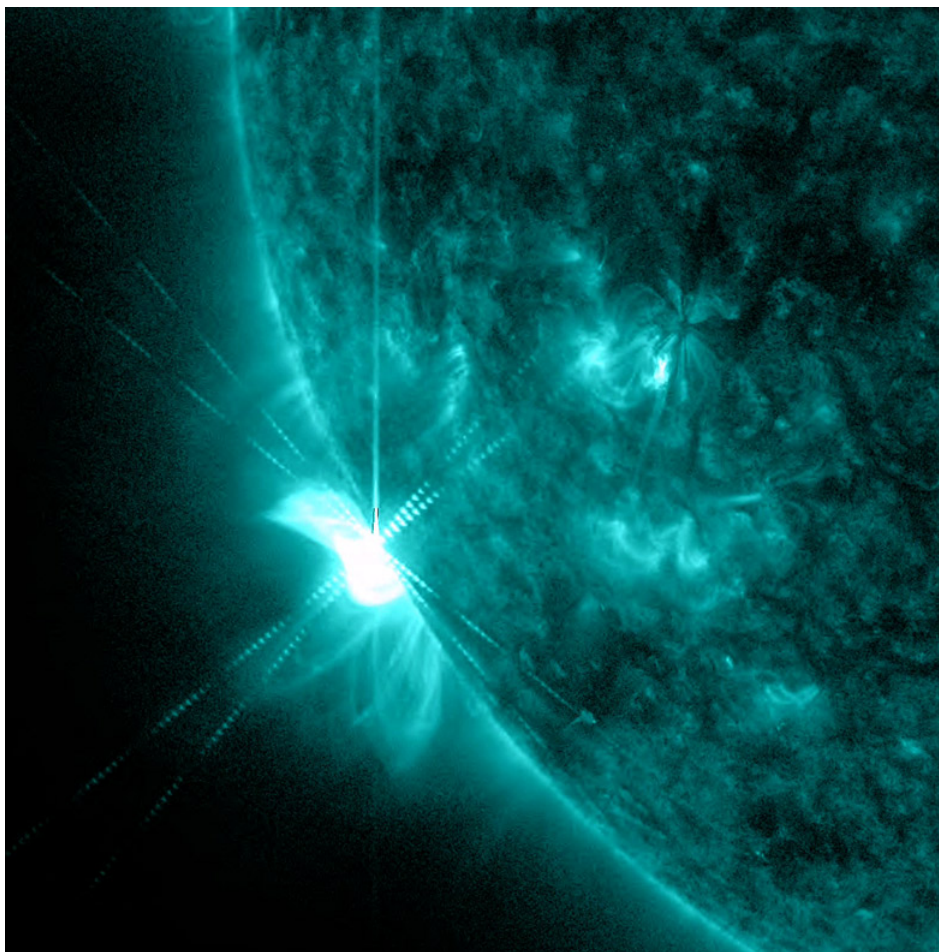


Figura 1.7: Fotografía tomada por NASA'S *Solar Dynamics Observatory* (SDO) del extremo de luz ultravioleta (131 Angstrom) y la región activa donde ocurrieron más de 12 ráfagas solares entre el 8 y 10 de octubre de 2012. Fuente: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/potw/item/378>

Estas ráfagas solares son clasificadas por las letras A, B, C, M o X según el flujo (W/m^2) (Holman G. & Benedict S. (1996)), siendo las letras A y B las que denotan un flujo débil y las C, M y X flujos más grandes o intensos. La escala está establecida de forma logarítmica, así por ejemplo: una ráfaga clase X es diez veces más intensa que una ráfaga clase M, y cien veces más intensa que una tipo C. Adicionalmente existe una subclasificación más fina entre estas clases, expresada numéricamente. Para la clase C y M esta subclasificación está expresada del 1 al 9. Sin embargo, para la clase X no existe un límite numérico.

Usualmente estos eventos están ligados a su vez a otro fenómeno solar llamado Eyecciones de Masa Coronal o EMC.

1.3.2. Eyecciones de Masa Coronal (EMC)

Las Eyecciones de Masa Coronal o EMC se definen como plasma liberado estrepitosamente desde la corona solar hacia el viento solar y son producidas por las torceduras de un intenso campo magnético solar. A medida que la eyección es expulsada por el Sol, ésta crea una onda de choque como lo muestra la figura 1.8 que acelera al viento solar V y modifica la intensidad del campo magnético B . Estas dos magnitudes aumentan dentro de una región cercana al choque.

Tanto las ráfagas como las EMC, son fenómenos que suelen estar asociados con las manchas solares (ver sección 1.3.3). Además, la frecuencia de ambos está ligada a la evolución del ciclo solar. Inclusive se ha detectado que durante los máximos solares (sección 1.3.4) el Sol es capaz de producir alrededor de tres EMC al día, mientras que cerca del mínimo Solar sólo un EMC es producido cada cinco días (Christian R. E. (2012)).

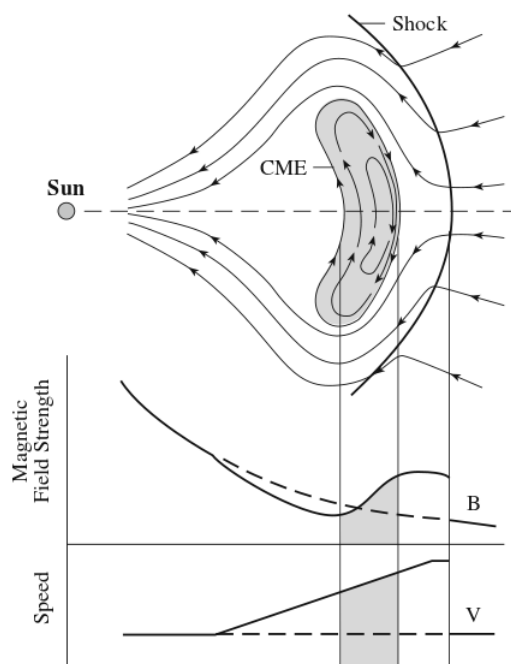


Figura 1.8: Perfil de una EMC justo antes de un choque interplanetario junto con la variación del viento solar y su campo magnético. Tomado de: Lang K. R. (2009)

La velocidad de estas eyecciones puede variar en dos órdenes de magnitud, de $\sim 20\text{km/s}$ a más de 2500km/s dependiendo de la fase del ciclo solar en que ocurran. Para el mínimo solar, las velocidades son cercanas a los 300km/s , mientras que en el máximo solar es de 500km/s (Gopalswamy N. et al., (2004)).

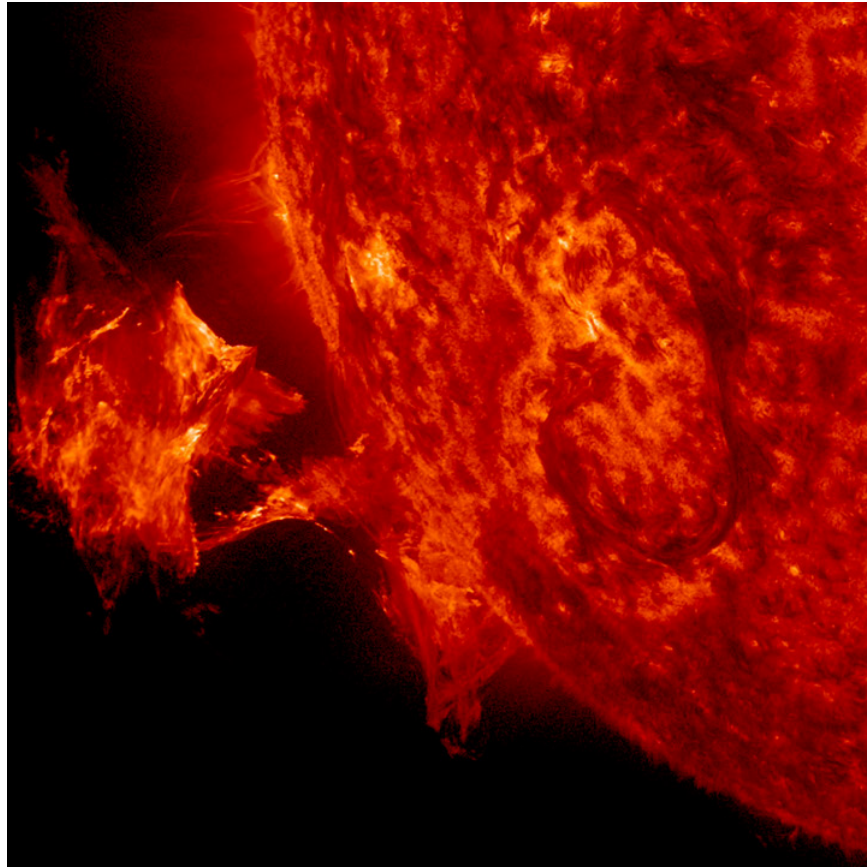


Figura 1.9: Fotografía tomada por NASA'S Solar Dynamics Observatory (SDO) de un EMC detectado el día 26 de septiembre de 2014. El material expulsado es Helio ionizado a $60,000^{\circ}\text{C}$.
Fuente: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/potw/item/562>

Los parámetros físicos y geométricos que definen estas EMC, pueden ser obtenidos a través del análisis fotográfico generado por LASCO¹⁰ (Large Angle Spectrometric Coronagraph) el cual es capaz de tomar imágenes de la corona solar a una distancia aproximada de un séptimo de UA o aproximadamente 21 millones de kilómetros. Bloqueando con un disco la luz proveniente de este, creando un tipo de eclipse donde el círculo blanco indica la posición del disco solar (ver fig. 1.10).

Esta figura (1.10) es un ejemplo de una fotografía tomada tanto por LASCO C2 y LASCO C3 respectivamente. En ellas se puede apreciar como las eyecciones de masa coronal son expulsadas fuera del Sol e inclusive logran cruzar los campos visibles de los coronógrafos que las toman. Estas imágenes muestran la corona interna de una EMC siendo su radio de alcance de hasta 8.4 millones de kilómetros fuera del Sol. Mientras que LASCO C3 tiene un campo de visión aún más extenso. El cual es capaz de abarcar hasta 32 veces el diámetro del Sol. Es decir, el diámetro de

¹⁰Instrumento que consta de tres coronógrafos desarrollados por el *Solar and Heliospheric Observatory SOHO* como parte de una misión espacial donde participan entidades como los Estados Unidos, Francia, Alemania e Inglaterra *Miohels D. et al., (1995)*.

las imágenes es de 45 millones de kilómetros a partir del Sol o la mitad de la órbita de Mercurio (Howard R. (2003)).

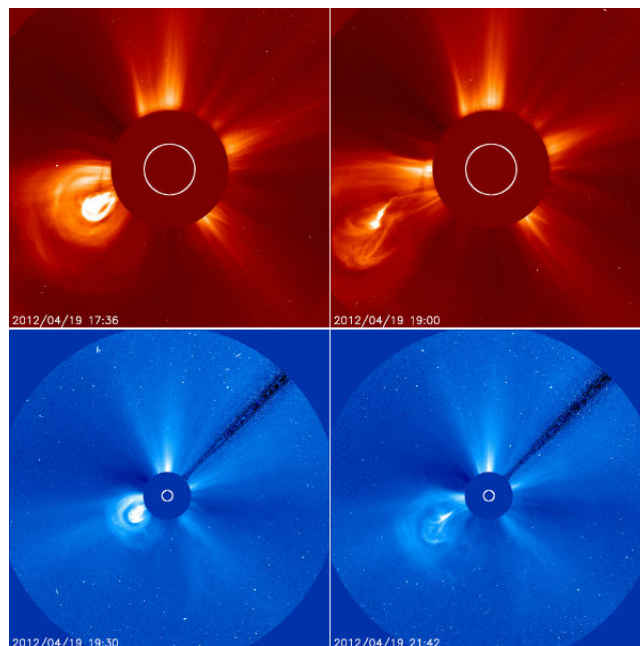


Figura 1.10: Fotografías tomadas para la misma EMC vista a través de LASCO el día 19 de abril de 2012: *Fotografías superiores*: CME capturado por LASCO C2, *Fotografías inferiores*: CME capturado por LASCO C3. Tomado de SOHO NASCOM Gallery.

Este tipo de EMC producen las más grandes perturbaciones de campo magnético terrestre, lo que las convierte en las más geoeffectivas (Gosling J. T., et al., (1991)). Es por eso que su estudio es importante para el clima espacial. Cuando existe esta interacción con la magnetósfera terrestre, se les llama EMC tipo Halo. Estas aparecen como un brillo que se expande y rodea el disco de ocultación del coronógrafo. El ancho de este tipo de eyecciones es mayor a los 140° mientras que para las eyecciones normales el ancho característico es de $\sim 47^\circ$ y el rango para este ancho va de $20 - 120^\circ$ (Webb D. F. et al., (2000)).

Más adelante se describirá cómo esta alta intensidad de los campos magnéticos solares y el viento solar supersónico son los factores principales de las perturbaciones interplanetarias así como de la actividad geomagnética (ver sección 1.2.2).

1.3.3. Manchas Solares

Las manchas solares o *sunspots* son indicadores directos que surgen temporalmente sobre la superficie solar en forma de regiones oscuras. Estas manchas están ligadas a un ciclo de 11 años aproximadamente (sección 1.3.4) y son producidas por las torceduras de campos magnéticos sobre la superficie solar, dejando un aparente espacio hueco (en realidad no lo es) donde la temperatura llega a ser de $1000K$ más fría comparada con el resto de la superficie solar (Forcada S. J. (2013)). Esto se debe a la intensidad de su campo magnético que decremente monotónicamente a su alrededor (Sobotka M. (1999)). El tamaño de estas manchas puede ser tan grande como el de la Tierra o incluso hasta del tamaño de Jupiter.

Estas manchas pueden aparecer solas o en conjunto. Su conteo se realiza diariamente con equipo especializado comenzando de forma grupal y después individual. El número total de manchas puede también verse de la siguiente forma:

$$\text{ManchasTotales} = \text{ManchasIndividuales} + \text{ManchasGrupales} \times 10$$

El resultado de esta ecuación es siempre cero o mayor que once. Esta aproximación es bastante confiable aún cuando las condiciones de observación impiden la detección de manchas demasiado pequeñas (Hathaway, David H. (2015)).

Este conteo es llevado oficialmente por dos instituciones, una de ellas es *The International Sunspot Number* a cargo de *The Solar Influences Data Analysis Center* en Bélgica. A su vez debe coincidir con el conteo medido por la segunda entidad que es el NOAA producido por el *US National Oceanic and Atmospheric Administration*. Estas manchas solares son además asignadas con un número por la segunda entidad y clasificados según su tamaño y complejidad en una escala conocida como *Zurich modificada*.

Estas manchas, además de servir de indicadores posicionales en el surgimiento de un campo magnético inestable desde el interior del Sol, suelen ser también escenarios donde pueden ocurrir las EMC y las ráfagas de las que ya se ha mencionado su existencia previamente.

1.3.4. Ciclo de Manchas Solares

Al graficar el número total de manchas solares diario se descubrió que existe un aumento y disminución como lo muestra la figura 1.11. El tiempo que transcurre entre dos valores relativos críticos mínimos se le conoce como ciclo solar, los cuales tienen un periodo de duración aproximada de 11 años, aunque esta duración puede variar entre 7 y 15 años (Forcada S. J. (2013)).

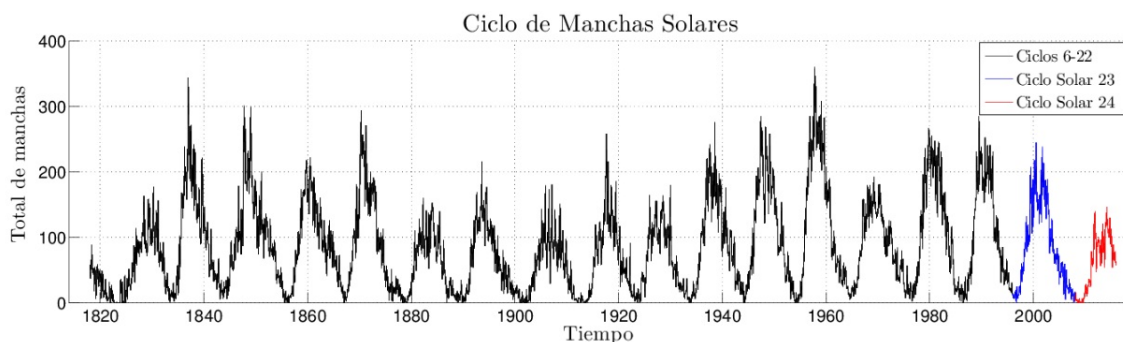


Figura 1.11: Gráfica de las manchas solares anuales desde 1818 con datos obtenidos de NASA's *Ames Research Center en California*.

Los astrofísicos piensan que existe una relación entre el número de manchas solares y la actividad solar. Este fenómeno comenzó a registrarse a partir de 1755, es decir, hace más de 250 años. Actualmente se tienen registrados 24 ciclos solares (el último aún sin finalizar). Las causas y la naturaleza de estos ciclos constituyen hasta la fecha un gran reto y misterio para toda esta comunidad espacial, que en general aún son incapaces de crear un modelo confiable que prediga el número futuro de manchas solares usando principios básicos de la física (Svalgaard L. (2013)).

Es importante hacer notar que la aparición geográfica de estas manchas sobre la corteza solar no ocurre de forma aleatoria, sino que existe una tendencia de estas a concentrarse a latitudes cercanas al ecuador solar conforme avanza el ciclo solar, en un fenómeno llamado *diagrama mariposa* (ver diagrama 1.12).

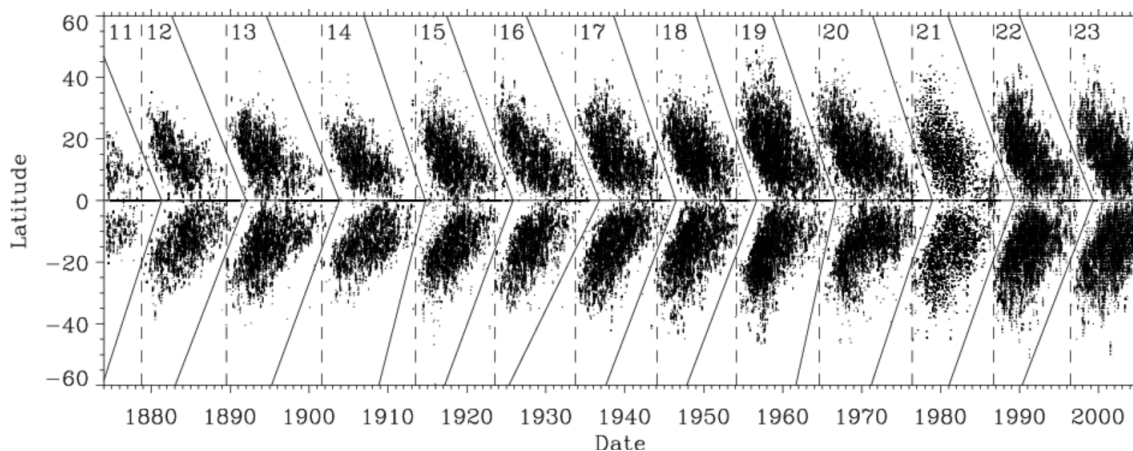


Figura 1.12: Distribución espacial de las manchas solares conocida como diagrama mariposa. Tomado de: Solanki et al., (2008)

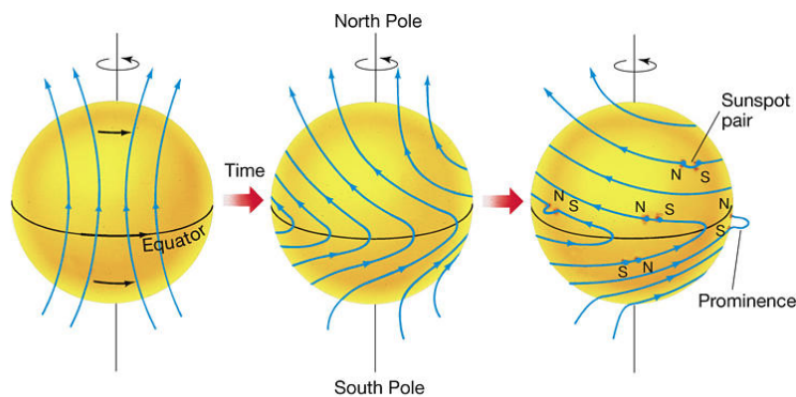


Figura 1.13: Descripción gráfica del movimiento de las manchas solares sobre la corteza. Tomado de: Pearson Prentice Hall, Inc. (2011).

La posición de estas manchas varía latitudinalmente. A medida que el ciclo avanza, la latitud promedio de las manchas decreciente, aglomerándose muy cerca del Ecuador solar en una forma peculiar en ambos hemisferios. Al observar que la velocidad con la que se movían estas manchas diariamente era mayor a latitudes ecuatoriales que a latitudes más altas, se dedujo que el Sol rotaba diferencialmente (Wilson R. P. (1994)). Esta rotación hace que los polos magnéticos del Sol se inviertan cada 11 años, es decir, el Norte se vuelve Sur y el Sur Norte. Así, cada 22 años los polos regresan a su posición original.

Actualmente se sabe que la actividad solar llega a ser más frecuente durante la etapa máxima de los ciclos solares y menos frecuente durante la mínima. Tal fue el caso del *mínimo de Maunder* donde en extremo pocas manchas solares fueron detectadas (Eddy A. J. (1976)). Esta etapa de poca actividad solar llevó a un periodo climático terrestre llamado “pequeña Edad de Hielo” en donde los ríos que normalmente están a temperatura ambiente se congelaron y las estaciones heladas

permanecieran constantes a latitudes bajas. Inclusive se tiene evidencia de que estos ciclos ya habían sucedido hace mucho tiempo.

1.4. Tormenta Geomagnética o TG

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

Para poder determinar el grado de intensidad de estas tormentas es necesario caracterizarlas por medio de un índice.

1.4.1. Índice Dst

Famosamente conocido como Dst (Disturbance Storm Time) este índice se encarga de medir perturbaciones geomagnéticas que se sabe están estrechamente relacionadas con los cambios en la densidad ionosférica. Este es obtenido por observatorios muy cercanos a la zona ecuatorial que miden la intensidad de la corriente eléctrica concentrada en el anillo de corriente y que describen el comportamiento de la magnetósfera. Sus unidades son los nanoteslas (nT).

Un Dst positivo representa compresión sobre la magnetósfera, mientras que valores alrededor del cero representan una magnetosfera tranquila. Por último un Dst negativo delataría la ocurrencia de una perturbación ionosférica (PI). Este último puede durar desde horas hasta días. Incluso durante esta etapa pueden generarse segundas caídas, aún y cuando la magnetósfera no ha logrado recuperarse completamente. Son cuatro los observatorios geomagnéticos que orbitan la Tierra a bajas latitudes y que trabajan conjuntamente en la caracterización de este índice: Hermanus en el sur de África, Honolulu y San Juan ambos en EUA y por último Kakioka en Japón.

Para calibrar este índice es necesario tomar la media de los días quietos, el cual puede tomar valores positivos o negativos. Como se mencionó antes, al comprimirse la magnetósfera se incrementa la densidad de líneas de campo magnético adquiriendo en ese caso valores positivos, por otro lado si la densidad en la corriente de anillo aumenta, el valor del índice resultará con signo negativo. Estos valores son etiquetados como lo muestra la tabla 1.3.

Tipo de TG	Valor del índice Dst [nT]
Quieta	$-30 < Dst$
Débil	$-50 < Dst \leq -30$
Moderada	$-100 < Dst \leq -50$
Intensa	$-250 < Dst \leq -100$
Fuerte	$Dst \leq -250$

Tabla 1.3: Clasificación de las TGs según su grado de perturbación sobre la ionosfera (González et al., (1999)).

La razón principal de una TG, al menos intensa, es la ocurrencia de un intenso campo magnético

interplanetario en dirección sur (visto desde el sistema de coordenadas terrestre) y de larga duración ($B_z \sim -10nT$ y $\Delta t \sim 3hrs$, $E_y \geq 3mV/m$), lo que permite una mayor transferencia de energía efectiva entre el viento solar y la magnetósfera a través de la reconexión magnética en regiones cercanas al *shock wave*. Esta a su vez, tiene una estrecha relación con las diferentes fases del ciclo solar (Echer et al., (2008)). Donde para la fase mínima ascendente solo tres TGs son detectadas al año, 8.5 en la fase máxima y 6.5 para la fase mínima descendente. Haciendo ver una mayor ocurrencia de estas durante el periodo máximo solar que durante las fases mínimas.

1.4.2. Fases de una Tormenta Geomagnética

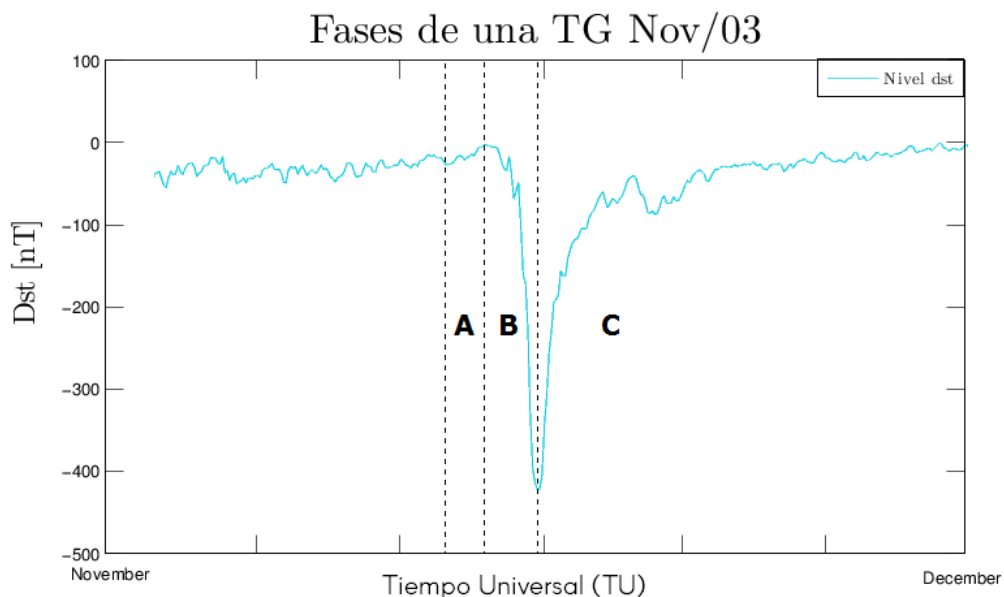


Figura 1.14: Gráfica de las tres diferentes fases de una tormenta geomagnética. Gráfica construida a partir de los datos tomados de Dst Kyoto Index..

Todas las tormentas geomagnéticas pueden ser divididas por medio de tres fases (ver figura 1.14): La fase inicial **A** es el inicio de un periodo de incremento en la presión dinámica debido al paso de un choque interplanetario. Este impulso repentino o SSC (*Storm Sudden Commencement*) que precede a una TG es también llamado comienzo repentino de la tormenta. Durante este SSC la distancia de la magnetopausa decrece de 10 a $6R_e$ ¹¹. Adicionalmente, la existencia o ausencia de este fenómeno permite obtener información relevante de la naturaleza misma que lo generó. Posteriormente, la fase principal **B** muestra la prolongación del campo interplanetario en dirección sur el cual puede estar en la eyecta, en la funda formada entre la EMC y el choque asociado o en ambas (Tsurutani et al., (2003)). Estas dos fases finalizan, con la fase de recuperación **C** de las condiciones normales, que es precisamente la última de las tres etapas.

Por otra parte, las tormentas provocadas por CIRs (*Corotating Interaction Region*) tienen un orden por arriba de $-100nT$ sobre el Dst. Además de que sus fases tienen un comportamiento y razón diferentes, por ejemplo, la fase inicial de estas son causadas por un incremento en la presión en la lámina de plasma de la hoja de corriente heliosférica. Mientras que la fase principal

¹¹El radio de la tierra o R_e es de 6371 km.

es causada por reconexión magnética entre la componente magnética B_z sur (ver fig. 1.15) de la CIR y el campo magnético de la magnetopausa. Estas fases son generalmente irregulares en perfil, es decir, el Dst no decrece monotónicamente con el tiempo. 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)).

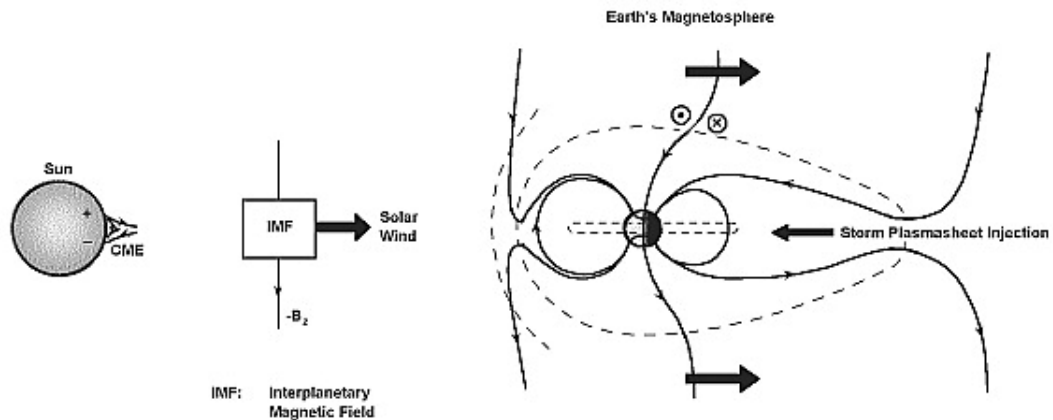


Figura 1.15: Proceso de reconexión magnética durante una tormenta geomagnética. Tomado de: Tsurutani et al., (2003)

Los niveles del Dst tienen dos razones. La primera es el proceso de inyección de energía a la corriente de anillo y otro por la disipación en la corriente de anillo. Estos procesos están dados en función del CMI y de la intensidad del anillo, respectivamente (Russell et al., (1974)).

Esta última está dada por la relación Dessler-Parker-Sckopke:

$$3E_m \times Dst^*(t) = 2B_0 \times E(t)$$

En esta ecuación E_m es la energía magnética total del campo geomagnético fuera de la tierra ($E_m = 8 \times 10^{24} \text{ ergs}$), Dst^* es el decremento del campo magnético debido a la corriente de anillo, B_0 es la media del campo magnético sobre la superficie ecuatorial y $E(t)$ es la energía cinética de la corriente de anillo (González E. J. (1994); Greenspan & Hamilton (2004)).

1.5. Ionosfera Terrestre

Este plasma, con igual o mayor importancia que el Sol, está aún más cerca de nosotros. De hecho es el plasma más abundante sobre la tierra, literalmente, protegiendo no sólo de grandes temperaturas sino de toda esa radiación altamente energética proveniente del espacio. En particular, la ionosfera¹² es una capa atmosférica variante entre la Mesósfera y la Exósfera debido a los diferentes efectos de rotación, traslación e inclinación de la Tierra (todos ellos descritos más adelante) y se forma por el resultado de la absorción de la radiación de luz ultravioleta proveniente del Sol.

¹²Nombrada precisamente así por su alto grado de ionización.

En esta capa encontraremos que la colisión entre partículas es demasiado escasa como para lograr recombinarse, formando así una población de plasma parcialmente ionizado (2×10^{-3}) (De-lobeau F. and Lesh J. (1971)). Además, durante este proceso están presentes corrientes eléctricas y campos electromagnéticos debido a liberación de electrones libres perdidos por cada molécula o átomo involucrado. Funge además como la interface entre la atmósfera terrestre y el espacio (Kelley M. C. (2009)). La dinámica de estos dos medios tan diferentes hace necesario el análisis de su formación y perturbación.

La gráfica 1.16 muestra la atmósfera neutra y su división de capas en dependencia del aumento de temperatura sobre la Tierra. El perfil comienza en 1 km a temperaturas cercanas a 300 K aproximadamente. Adicionalmente, al término de cada capa y como continuación de la siguiente, existen también otras regiones como la tropopausa, estratopausa, mesopausa y la termopausa.

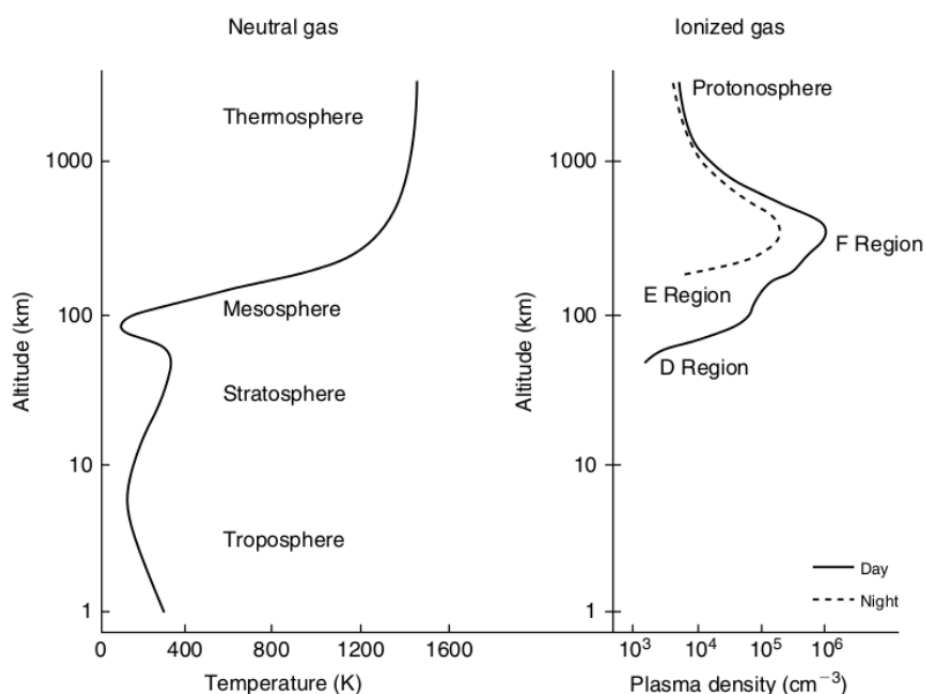


Figura 1.16: *Izquierda:* Perfil de la atmósfera neutra y su variabilidad térmica. *Derecha:* Perfil para la densidad eléctrica de un gas ionizado tanto para el día como para la noche. *Tomado de:* (Kelley M. C. (2009))

1.5.1. Estructura Ionosférica

La ionosfera se divide principalmente en cuatro capas, nombradas en orden alfabético (C, D, E y F) según su grado de ionización. Sin embargo, la altura puede llegar a variar según el autor. A continuación se describe brevemente cada una de ellas según el autor Ratcliffe, J. A. (1972).

Siendo la *capa C* la capa más baja de todas, esta se forma gracias a los efectos de radiación cósmica. Además, posee una conductividad de $1.8 \times 10^{-7}\text{ S/m}$ es decir, una densidad de entre 60 a $160\text{ electrones/cm}^3$. Esta se ubica entre los 50 y 60 km de altura.

Por otro lado, la *capa D* tiene una tasa de recombinación mayor a la *capa C*, por lo que el efecto neto de ionización es bajo y las ondas de radio de frecuencia alta (10MHz) son absorbidas. Esta propiedad de absorción disminuye por la noche y alcanza sus valores máximos durante el mediodía. Sin embargo, esta capa desaparece durante la noche.

La estructura de la capa posterior *capa E* o Kennelly-Heaviside está dada principalmente por los efectos de ionización y recombinación. Aunque es capaz de reflejar frecuencias menores a 10MHz solo contribuye a la absorción de frecuencias mayores. Además, dentro de esta misma capa, aparece la *capa esporádica* o E_s producida por eventos solares intensos, la cual refleja frecuencias de hasta 50MHz . Sin embargo, esta capa es temporal ya que desaparece debido al bajo grado de ionización al llegar la noche.

Por último, la *capa F* o *Appleton*, ionizada principalmente por el extremo ultravioleta ($10 - 100\text{nm}$) se subdivide durante el día en dos capas; F1 y F2 debido a una deformación en su perfil de densidad y se recombina de nueva cuenta en una sola durante la noche. Es la responsable de transmitir longitudes de onda a largas distancias.

1.5.2. Características de la Ionosfera

Las ondas de alta frecuencia (rayos X, gamma y UV) son las responsables de ionizar esta capa atmosférica que llega a tener entre -90°C y 1000°C y es la región atmosférica que se forma entre los 80km y 100km de altura (día y noche respectivamente) con una altura máxima de hasta 600km . A latitudes medias posee una densidad de electrones $n_e \simeq 10^5\text{cm}^{-3}$ y una temperatura de $T_e \simeq 10^3\text{K}$ con un orden de magnitud de campo magnético de 10^4nT .

Cabe mencionar que el desarrollo de las ondas de radio condujo al descubrimiento de la ionosfera en 1901 por Guillermo Marconi o también llamada termósfera o techo de plasma de la corteza terrestre el cual refleja algunas de estas ondas de vuelta a la superficie mientras que absorbe otras. Por lo que dió pie al estudio de esta capa atmosférica para la propagación de ondas a larga distancia. Gracias a esto, se identificaron una gran cantidad de ondas plasmáticas, propagándose dependiendo del ángulo de incidencia a través del campo magnético. Esta capacidad de reflexión está relacionada con las oscilaciones mismas del plasma. La frecuencia natural ω_p^2 de oscilación está dada por la ecuación:

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N}{\epsilon_0 m},$$

donde e y m es la carga y masa del electrón respectivamente, N es el número de electrones por unidad de volumen y ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío, siendo entonces la frecuencia natural proporcional a la densidad de los electrones.

Dentro de la ionosfera no solo ocurren las auroras polares, sino que también están presentes tormentas y subtormentas magnéticas que afectan redes eléctricas y sistemas de comunicación, incremento de temperatura en la atmósfera superior polar, el impulso de grandes vientos atmosféricos neutros, energización de la mayor parte del plasma contenido en las líneas de campo magnético terrestre, además de crear un extenso sistema circulante de plasma dentro y sobre el ambiente espacial cercano a la Tierra (Kelley M. C. (2009)). Debido a fenómenos del Clima Espacial (CE) e incluso propios de la misma atmósfera, la ionosfera terrestre puede tener perturbaciones espaciales y temporales en el contenido de electrones que la conforman. Estas perturbaciones serán abordadas con mayor detalle en el capítulo 2 de este trabajo.

1.6. Motivación de esta Tesis

Las tormentas geomagnéticas intensas, así como las ráfagas más energéticas, tienen una estrecha relación con las perturbaciones ionosféricas. Aunque a grandes latitudes esta relación ha sido más estudiada, a latitudes como las del territorio mexicano no lo ha sido hasta ahora. Un paso importante que se está dando en el país en cuanto a este estudio es el uso del código US_TEC de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos de América. A través de este código, que hace uso de datos de estaciones fijas, es posible monitorear y estudiar el contenido de electrones de la ionosfera en presencia de eventos solares como los mostrados en este capítulo.

La motivación de este trabajo radica en cuantificar el impacto sobre el $vTEC$ ionosférico de varias tormentas geomagnéticas intensas que ocurrieron un año antes y un año después de la tormenta de *Halloween* (2002 al 2004). Particularmente estudiar eventos de EMC tipo halo y ráfagas solares tipo M y X.

Las metas propuestas en este trabajo, que se van a retomar en los capítulos siguientes son:

1. Especificar la causa (EMC tipo Halo, ráfagas tipo M o X, viento solar) de la perturbación ionosférica para las dieciocho tormentas.
2. Encontrar una relación entre las tormentas geomagnéticas intensas utilizando el índice Dst, para conocer la respuesta del $vTEC$ a diferentes latitudes y longitudes sobre el territorio mexicano.
3. Cuantificar la diferencia entre el $vTEC$ perturbado y su mediana $vTEC$ ($mvTEC$) de 27 días previos.
4. Conocer el impacto de la PI sobre latitudes altas y bajas utilizando como referencia las coordenadas de la ciudad de Ensenada y Morelia respectivamente.
5. Estudiar específicamente las frecuencias observadas de estas variaciones a través de análisis de *wavelets* y Fourier.
6. Emitir conclusiones preliminares de este estudio y estudiar posibles mejoras en el mismo.

Capítulo 2

Estudio del Clima Espacial

En esta parte se introduce el significado de las tormentas ionosféricas, incluyendo un índice de perturbación que permite la clasificación de las mismas. También, se presentan todos los eventos de interés en los cuales el índice Dst se redujo hasta valores menores a $-100nT$. Así como las bases de datos de donde se obtuvo la información de las EMC y ráfagas solares, así como los criterios para filtrarlas. Por último, como es que podemos calcular el contenido total de electrones TEC por medio de señales GPS y que haremos con él por medio del método de *wavelets*.

2.1. ¿Qué es el Clima Espacial?

Estudiar el Clima Espacial (CE) o meteorología del espacio es fundamental en el mundo actual, por la gran dependencia tecnológica que la sociedad en general tiene en diversos rubros, tales como las telecomunicaciones, posicionamiento a través de GPSs, navegación aérea, entre otros. Recientemente en México este tema ha cobrado relevancia a través del Servicio de Clima Espacial en México (SCIESMEX) desde el 2014. La definición más aceptada del CE indica que éste es el estudio, en tiempo real, de la actividad solar que logra influenciar directa e indirectamente las propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera terrestre, su ionosfera y atmósfera en general, incluso sobre la superficie terrestre (Moldwin, M. (2008)).

Según la *National Weather Service* y el *Space Weather Prediction Center* estas mediciones en tiempo real (o cercanas al tiempo real) se pueden dividir en tres categorías: sobre la superficie solar (ráfagas solares y EMC), en el medio interplanetario (eventos-radio, viento solar y centelleo interplanetario) y en la vecindad terrestre (campo magnético, condiciones del viento solar in situ, ionósfera y partículas energéticas). A cada medición se le asocia un índice que mide el nivel de perturbación asociado a eventos solares eruptivos y a su vez, define una escala de intensidad.

2.1.1. ¿Cuáles son sus efectos en la Tierra?

Cuando estos fenómenos solares ocurren alrededor de la región centro-ecuatorial del disco solar, la probabilidad de afectar la magnetósfera terrestre y la ionosfera, es mayor. Cuando esto sucede, se forman las tormentas geomagnéticas y las tormentas ionosféricas. Generalmente la ionosfera puede verse afectada más por eventos como ráfagas solares, EMC y viento solar rápido en interacción con viento solar lento (Rodríguez M. et al., (2014)).

Se ha encontrado además que las tormentas geomagnéticas intensas (producto de eventos de partículas energéticas en el Sol) pueden dañar o destruir no solo a los satélites que se encuentran orbitando la Tierra, sino a los astronautas durante misiones largas sobre la Luna o Marte. En el pasado han ocurrido fenómenos que han impactado a la Tierra y que por ejemplo han dejado sin energía eléctrica a ciudades del hemisferio norte de la Tierra. Actualmente se ha visto que la confiabilidad y la precisión de los instrumentos de comunicación y navegación basados en GPS puede verse afectada en gran medida por este tipo de eventos (Moldwin, M. (2008)).

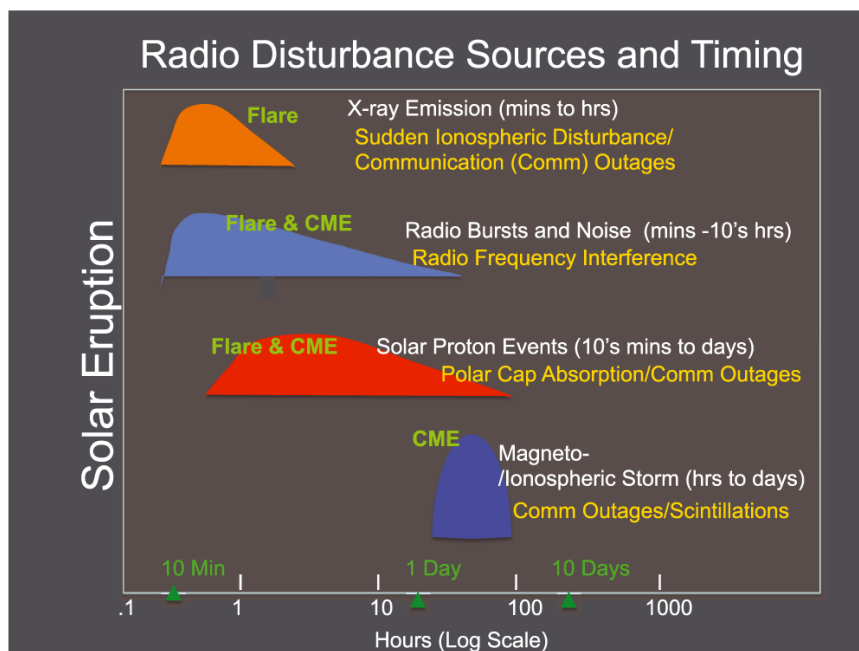


Figura 2.1: Tiempo aproximado de arribo (en escala logarítmica) para diferentes casos de actividad solar. Las letras blancas son los eventos solares, las amarillas son los efectos observables sobre la Tierra. Tomado de: Knipp et al., (2016)

La gráfica 2.1 nos da una idea más clara de la duración de estos efectos, pero además del poco tiempo que se tiene para alertar a la comunidad.

2.2. Perturbaciones Ionosféricas (PI)

Dentro de los diversos efectos del CE, las Perturbaciones Ionosféricas (PI) son motivo de estudio en este trabajo. Dada la gran complejidad de la estructura ionosférica, éstas se clasifican dependiendo no solo por las actividades propias del Sol como son las *perturbaciones irregulares*, sino también por los movimientos de rotación y traslación de la Tierra que se les conoce como las *perturbaciones regulares*. La diferencia principal entre ambas es que las primeras son impredecibles por tratarse de un comportamiento esporádico del Sol, mientras que las segundas ocurren en base a un ciclo aproximado.

Todos estos factores modifican las condiciones atmosféricas y ionosféricas terrestres significativamente, no sólo a latitudes grandes (tómese el ejemplo de las auroras boreales en los polos) sino también a latitudes medias y bajas, como es el caso de las anomalías ecuatoriales¹. Por lo

¹Fenómeno ionosférico entre el campo eléctrico y el campo magnético terrestre capaz de crear ionización a 17grados

cual, el estudio de estas perturbaciones se vuelve de suma importancia más aún cuando se habla de propagación de ondas.

A continuación se describen los dos tipos de variación solar:

2.2.1. Variaciones Regulares

1. *Variación diurna.*- Esta variación existe los 365 días del año y se debe a la rotación de la Tierra sobre su propio eje. Se produce por el efecto combinado de los sistemas de corrientes ionosféricas que fluyen en la capa E y la corriente inducida que fluye bajo la superficie terrestre denominado corrientes telúricas² (Domingo & Vidal (2016)).
2. *Variación Estacional.*- Como su nombre lo dice, depende de la estación del año o la ubicación de la Tierra junto con su ángulo de inclinación en su movimiento traslacional sobre su eje. Esta tiene una duración de ~ 27 días, los ángulos más grandes del Sol se ven reflejados en una mayor densidad de ionización de las capas D, E y F1. En contraste con la capa F2 ya que su densidad es mayor en invierno y menor en verano (Zou et al. (2000)).
3. *Variación Ciclo Solar.*- Esta variación es la de mayor duración (~ 11 años). A medida que el ciclo se acerca a sus valores máximos la variación de la densidad ionosférica aumenta, mientras que para valores de baja actividad solar la densidad disminuye. (ver sección 1.3.4)

2.2.2. Variaciones Irregulares

Existen varios tipos y se clasifican según las causas que lo originen:

1. *Esporádica E.*- Surge en la región E de la ionosfera en situaciones de ionización fuerte, situadas aprox a 110km de altura, se le asocia principalmente con fenómenos como meteoritos y tormentas, así como actividades solares y geomagnéticas variando latitudinalmente. Esta región puede llegar a tener una densidad diez veces mayor que la región E. Además, es capaz de reflejar el espectro electromagnético de altas frecuencias o HF lo que permite la comunicación a 1500 – 2000km de distancia.
2. *Efectos producidos desde abajo de la ionosfera.*- La dinámica de la termósfera particularmente a 100 – 250km de altitud involucra eventos como mareas atmosféricas que son generadas en la atmósfera baja (mesósfera y estratósfera) y se propagan hacia alturas ionosféricas bajas. Las mareas son oscilaciones de escala global producidas principalmente por ozono en la estratósfera y oxígeno molecular en la baja termósfera (Schunk et al., (2009)).
3. *Perturbaciones ionosféricas súbitas (SID por sus siglas en ingles).*- Son causadas por las ráfagas solares incrementan la ionización súbitamente en la región D. Causando absorción de frecuencias medias que pueden durar desde minutos hasta horas. Estas perturbaciones son más comunes en regiones ecuatoriales. Existen varias subclases de SID, por ejemplo: SPA(*Sudden Phase Anomaly*), SFD(*Sudden Frequency Deviation*), SCNA(*Sudden Cosmic Noise Absorption*), SEA(*Sudden Enhancement of Atmospherics*) (Davies Kenneth (1990)).

norte y sur y sobre el Ecuador mismo.

²Corrientes eléctricas bajo la Tierra o a nivel oceánico.

4. *Tormentas Ionosféricas*.- Estrechamente relacionadas a los eventos de EMC que comprimen la magnetósfera. Son de mayor duración que las SID y afectan principalmente a la región $F2$ aunque para eventos demasiado energéticos pueden afectar incluso regiones más bajas. Además las frecuencias críticas son más bajas que las normales.

2.3. Tormenta Ionosférica

Existe una gran diferencia entre los términos tormenta ionosférica y perturbación ionosférica. La primera se usa cuando existe una alteración a escala global en la densidad de electrones sobre la ionosfera, particularmente en la capa $F2$ por tener la densidad más grande y con mayor efecto en el campo magnético. Esta es además la respuesta a una tormenta geomagnética. Por otro lado, una perturbación ionosférica es solo una variación repentina, local y breve en la densidad electrónica.

La variabilidad de la ionosfera está dada por diferentes mecanismos responsables tanto de diferentes fuentes de ionización como de la morfología de la termósfera. El mecanismo de perturbación más corto en escalas de tiempo, es el aumento del flujo de radiación de altas energías debido a una ráfaga solar, lo que aumenta la ionización de las capas D y E (Thome & Wagner (1971); Prolss W. G (2004)).

El comportamiento de la densidad electrónica en comparación de la densidad provocada 27 días antes (rotación solar previa) es observable mediante el cálculo del contenido total de electrones o TEC (por sus siglas en inglés). A estos incrementos y decrementos de concentración electrónica se les conoce como *efectos de fase positiva* y *efectos de fase negativa* respectivamente. Ambos efectos son producidos por procesos diferentes. Además el efecto global producido por estas tormentas no siempre es el mismo. Mientras que para una misma tormenta el comportamiento de la ionosfera varía, dependiendo del tiempo local de incidencia así como de la latitud (Vargas C. et al., (2012)).

Otra fuente importante de variabilidad en la ionosfera proviene de las partículas cargadas que interactúan con la atmósfera neutra de la termósfera (Cohen H. R. (1976)). Estos vientos termosféricos pueden contraer o alargar a la ionosfera, logrando incluso reubicar su altura.

La relación que existe entre la capa $F2$ y una tormenta geomagnética, se puede expresar matemáticamente como:

$$\frac{\delta foF2}{100} = \frac{foF2_{obs} - foF2_{med}}{foF2_{med}},$$

donde $foF2$ se le conoce como frecuencia crítica, y $\delta foF2$ representa la desviación de frecuencia crítica, es decir, el efecto producido sobre esta durante el día de una tormenta magnética respecto a la mediana mensual $foF2_{med}$.

Una medida para cuantificar el estado de ionización del plasma ionosférico son los índices ionosféricos, en particular el índice W.

2.3.1. Índice W

El propósito fundamental de este índice W es caracterizar un estado quieto a uno perturbado cuantificando la densidad del plasma existente sobre la ionosfera, es decir, una cuantificación di-

recta. Además, la correlación de W con los fenómenos solares observables es más profunda, ya que han existido tormentas ionosféricas bajo condiciones geomagnéticas quietas (Stanislawska I. & Gulyaeva T. (2015)).

La definición matemática de este índice, está dada en la ecuación 2.1 con una escala logarítmica en base diez que relaciona el $vTEC$ durante la perturbación y la mediana del $vTEC$ ($m(vTEC)$) de los 27 días previos (1 rotación solar). Este cociente nos permite hacer una clasificación como la que se presenta en la tabla 2.1.

$$W = \log \frac{vTEC}{m(vTEC)} \quad (2.1)$$

Escala	Criterio del índice W	Clasificación de la tormenta
+4	$W > 0.301$	W intensa positiva + tormenta
+3	$0.301 \leq W > 0.155$	W moderada + tormenta o subtormenta
+2	$0.155 \leq W > 0.046$	W moderada + alteración
+1	$0.046 \leq W > 0.0$	W tranquila + agitación
0	$W = 0$	Estado de referencia tranquilo
-1	$0.0 > W \geq -0.046$	W tranquila + agitación
-2	$-0.046 > W \geq -0.155$	W moderada + alteración
-3	$-0.155 > W \geq -0.301$	W moderada + tormenta o subtormenta
-4	$W < -0.301$	W intensa negativa + tormenta

Tabla 2.1: Clasificación de una tormenta ionosférica según el índice W .

Los criterios para definir los intervalos de esta clasificación están basados en la evaluación convencional de la desviación negativa f_oF2 ionosférica, siendo $[0, -10\%]$ para un día quieto, $[-10, -30\%]$ para una perturbación moderada, $[-30, -50\%]$ para una tormenta ionosférica y un agotamiento de f_oF2 mayor que -50% para condiciones extremas o anómalas (Gulyaeva et al., (2008)). Además, el signo de W nos da información sobre el paso de la fase positiva o negativa de la perturbación ionosférica.

Este índice es una herramienta importante que refuerza el uso operacional de las telecomunicaciones y sistemas de navegación satelital, además de que nos provee de una mejor perspectiva sobre los fenómenos involucrados y cómo todos ellos desembocan en la confirmación de una tormenta.

2.4. El Ciclo Solar 23

Una vez definidos los fenómenos solares y sus efectos sobre la Tierra, centraremos nuestro periodo de estudio en la fase descendente de este ciclo. Como parte del estudio que se realizará en este trabajo, se analizarán una serie de eventos solares que además de haber tenido un gran impacto en el campo magnético, también lo hayan tenido en la ionosfera. Dicho análisis permitirá caracterizar estas perturbaciones con la finalidad de entender su comportamiento y cuantificarlas en diferentes latitudes del territorio mexicano y estudiar finalmente sus escalas temporales en esta misma región.

La gráfica 2.2 muestra el conteo de manchas solares durante el Ciclo Solar 23, donde se observa que los años 2002 al 2004 pertenecen a la fase de descenso. Cabe mencionar que este ciclo inició

en mayo de 1996 y culminó en enero de 2008. Numéricamente tuvo una duración de 4380 días aproximadamente (805 días sin manchas solares) que equivalen a 11.6 años, con un conteo mensual máximo de 244 manchas solares en el mes de julio del año 2000. Es importante mencionar que la razón por la que se usó este periodo como base del estudio de este trabajo, radica en el hecho de que estadísticamente se ha observado que durante la fase de ascenso o descenso de cada ciclo solar es donde ocurren los fenómenos más energéticos en el Sol; además de que la distribución de datos de estaciones fijas GPSs en territorio mexicano, comienza a ser importante en este periodo.

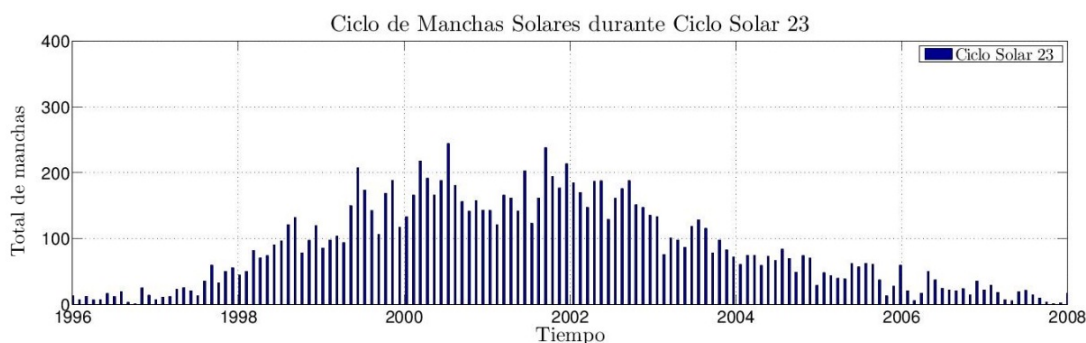


Figura 2.2: Manchas solares mensuales durante el Ciclo Solar 23 con datos obtenidos de *SILSO data/image*, *Royal Observatory of Belgium, Brussels*.

2.5. Catálogo de Ráfagas Solares

Para el análisis de las perturbaciones ionosféricas que se utilizará en este trabajo, será necesario consultar catálogos sobre eventos diversos que ocurren en el Sol. Particularmente es posible utilizar el catálogo³ construido por *TIMED-SEE (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics- The Solar EUV Experiment)* a través de las observaciones en una misión a cargo de la NASA. Esta misión se localiza entre los 60 – 180km sobre la superficie terrestre.

El experimento Solar EUV o SEE suministra las mediciones correspondientes a estas ráfagas en un rango de 0.1 – 193nm a través de una imagen completa del espectro formado a través de la atmosfera solar. El rango de estas mediciones va desde la corona solar en rayos X UV (0.1 – 10nm), el espectro ultravioleta EUV (10 – 120nm), hasta el lejano UV (FUV, 121 – 193nm) con emisiones formadas principalmente en la cromósfera y fotosfera alta (Woods & Francis (2006)).

2.6. Catálogo de EMC

El segundo catálogo es construido por el *Large Angle and Spectrometric Coronagraph* o *LASCO* (por sus siglas en inglés) a bordo de la misión *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). Es una base de datos que contiene información acerca de todas las EMC identificadas manualmente desde el año 1996 hasta 2016. Esta detección es realizada a través de tres telescopios (monitores): C1, C2 y C3. Donde sólo los datos de los primeros dos se siguen utilizando actualmente.

³El catálogo se encuentra disponible al público en: <http://lasp.colorado.edu/home/see/data/see-flare-catalog/>

Esta base de datos se encuentra disponible al público a través de la página: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html y fue la que se utilizó para recolectar todas las EMC.

SOHO LASCO CME CATALOG												
YEAR	MONTH											
1996	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1997	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1999	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2001	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2002	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2004	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2005	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2006	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2007	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2012	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2013	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2014	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2015	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct		

Figura 2.3: Rango de datos analizados del Catálogo SOHO LASCO CME.

Cabe resaltar que estos datos están incompletos debido a la falta de un detector automático totalmente confiable, siendo la detección manual la mejor forma hasta ahora de recaudar toda la información. Esta base de datos esta publicada en forma matricial (ver figura 2.3); organizada por años (filas) y meses (columnas) principalmente. Cada mes contiene una lista completa de todos y cada uno de los EMC detectados. Cada fila representa una y solo una EMC junto con sus respectivas características (ver figura 2.4) que más adelante se describirán a detalle. Adicionalmente, debajo del mismo catalogo se encuentra una breve información que describe cada uno de los parámetros junto con sus unidades dimensionales. Como cada EMC es única, se le asigna un ID que corresponde a la fecha y hora en que fue detectada dentro del campo de cobertura (FOV *field of view*) de LASCO/C2 y con respecto al ángulo de posición central o CPA (por sus siglas en inglés). Cabe destacar que el FOV del C2 es capaz de capturar varios EMC incluso si estos ocurren al mismo tiempo (múltiples EMC pueden ocurrir al día) gracias a la distinción del ángulo de posición central CPA.

Las EMC son denominadas geoeffectivas cuando estas EMC logran impactar la Tierra. Gracias a estos observatorios es posible detectar la ocurrencia de este tipo de EMC, las cuales se les considera la fuente principal de tormentas geomagnéticas no recurrentes. Generalmente este tipo de tormentas se originan en las regiones cercanas al meridiano central solar. En el coronógrafo se detectan como un brillo resplandeciente que cubre por completa o parcialmente el disco de observación, de ahí el nombre *Halo* o aureola (Tripathi & Mishra (2005)).

First C2 Appearance Date Time [UT] (1)	Central PA [deg] (2)	Angular Width [deg] (3)	Linear Speed [km/s] (4)	2nd-order Speed at final height [km/s] (5)	2nd-order Speed at 20 Rs [km/s] (6)	Accel [m/s ²] (7)	Mass [gram] (8)	Kinetic Energy [erg] (9)	MPA [deg] (10)	Movies, plots, & links	Remarks
01/10/2003 02:20:05	66	26	270	305	638	14.5	2.10E+14	7.60E+28	64	3 PHTX DST Java M	Only C2
01/10/2003 05:40:06	258	44	422	444	541	5.6	3.10E+14	2.80E+29	255	3 PHTX DST Java M	
01/10/2003 23:50:06	279	11	223	192	0	-16.9	----	----	281	3 PHTX DST Java M	Only C2
02/10/2003 03:10:08	4	101	332	492	476	10.9	2.20E+15	1.20E+30	358	3 PHTX DST Java M	Only C3
02/10/2003 04:30:05	272	48	181	123	0	-17.2	1.10E+14	1.80E+28	272	3 PHTX DST Java M	Only C2
02/10/2003 05:20:06	94	13	766	---	---	---	----	----	95	3 PHTX DST Java M	Very Poor Event; Only 2 point
02/10/2003 18:40:05	288	51	183	155	0	-5	2.20E+14	3.80E+28	298	3 PHTX DST Java M	Poor Event
02/10/2003 19:40:05	116	11	489	443	0	-16.6	----	----	114	3 PHTX DST Java M	
03/10/2003 00:10:06	291	9	----	---	---	---	----	----	295	3 PHTX DST Java M	Very Poor Event; Only C2; Un
03/10/2003 06:50:07	255	4	918	791	0	-160	----	----	252	3 PHTX DST Java M	Only 3 points
03/10/2003 08:50:05	313	43	195	199	294	2.1*1	1.8e+14*2	3.4e+28*2	322	3 PHTX DST Java M	Poor Event; Only 3 points; On
03/10/2003 09:20:05	115	37	619	564	446	-11.6	3.10E+14	6.00E+29	109	3 PHTX DST Java M	
03/10/2003 15:10:05	273	8	417	557	1683	116.2*1	----	----	270	3 PHTX DST Java M	Only 3 points; Only C2
03/10/2003 20:56:51	261	8	643	---	---	---	----	----	259	3 PHTX DST Java M	Poor Event; Only 2 points; On

Figura 2.4: Tabla ilustrativa de los valores contenidos del catálogo de EMC obtenidos de la base de datos de SOHO LASCO.

- ¹ Fecha y hora detectada sobre LASCO/C2 vista de campo (FOV). Estas columnas también conforman el ID del CME.
- ² Central Position Angle (CPA).
- ³ Ancho del plano aéreo, comúnmente medido en el C2 FOV.
- ⁴ Velocidad obtenida por medio de un ajuste lineal para las mediciones altura-tiempo.
- ⁵ Velocidad calculada mediante ajuste polinómico cuadrático.
- ⁶ Igual que la anterior columna pero evaluada cuando el CME se encuentra a 20 radios solares de altura.
- ⁷ Positiva, negativa o igual a cero lo que significa que; aceleró, desaceleró o se mantuvo a una velocidad constante.
- ⁸ Valores de Masa representativos.
- ⁹ Valores de Energía Cinética representativos.
- ¹⁰ Measurement position angle. Idealmente igual al CPA sin embargo algunos CME no se mueven radialmente.
- *¹ Significa que el valor calculado no es preciso debido a una escasa medición de altura o un número bajo de mediciones altura-tiempo.
- *² Simbología en los valores como la Masa y la Energía Cinética para denotar poca precisión. Para valores poco precisos, la notación *2 es observable.

Cuando estas eyecciones aparecen cerca del meridiano central ya sea en la parte frontal o trasera del disco se les clasifica como simétrica (S). En cambio, cuando las EMC se originan en una distancia mayor del meridiano central se les clasifica como asimétricas (A). Esta última puede ser geométrica (OA) o resplandeciente (BA) (Gopalswamy N. et al., (2009)). Esta clasificación está incluida en esta tabla para cada EMC en la columna CPA.

2.7. Selección de Eventos Solares

La selección de eventos solares en este trabajo para su análisis posterior comenzó al estudiar el comportamiento del índice Dst a lo largo de los 365 días de cada año, durante los tres años de estudio (2002-2004). Los datos del índice Dst fueron obtenidos a través de la página: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/> con los cuales se graficó la variabilidad anual de la magnetósfera. Una vez realizada dicha gráfica y siguiendo la clasificación de una TG (ver página 18) fue posible identificar (a simple vista) la fecha y hora (TU) donde este índice alcanzó valores menores a los $-100nT$. Valores que delatan la ocurrencia de una tormenta geoelectiva, al menos de tipo intensa y que seguramente estarán ligados a perturbaciones ionosféricas.

Posteriormente se construyó una tabla de eventos (en orden de ocurrencia), destacando sus valores más relevantes como: FECHA, HORA, el valor Dst MÍNIMO en que ocurrió cada evento, así como el TIPO de tormenta (ver tabla 2.2). Es importante recalcar que el tiempo no solo de los

eventos dentro de la siguiente tabla, sino de algunos de los datos que se presentan en este trabajo están dados en Tiempo Universal (TU).

No. EVENTO	FECHA	TIPO DE TG	Dst MIN	TIEMPO TU
# 1	20/04/2002	Intensa	-149	09:00
# 2	11/05/2002	Intensa	-110	20:00
# 3	23/05/2002	Intensa	-109	18:00
# 4	21/08/2002	Intensa	-106	07:00
# 5	04/09/2002	Intensa	-109	06:00
# 6	08/09/2002	Intensa	-181	01:00
# 7	01/10/2002	Intensa	-174	17:00
# 8	21/11/2002	Intensa	-128	11:00
# 9	29/05/2003	Intensa	-144	24:00
# 10	18/06/2003	Intensa	-141	10:00
# 11	18/08/2003	Intensa	-148	16:00
# 12	30/10/2003	Fuerte	-353	23:00
# 13	20/11/2003	Fuerte	-422	21:00
# 14	22/01/2004	Intensa	-130	14:00
# 15	04/04/2004	Intensa	-117	01:00
# 16	27/07/2004	Intensa	-170	14:00
# 17	30/08/2004	Intensa	-129	23:00
# 18	08/11/2004	Fuerte	-374	07:00

Tabla 2.2: Tabla de las tormentas geomagnéticas con clasificación intensa y fuerte, durante el periodo 2002-2004.

Estos 18 eventos son el punto de partida para el análisis de la relación entre la actividad solar-magnetósfera-ionosfera. Para tales efectos, se contruirán una serie de mapas $vTEC$, se calculará el índice W , así como la aplicación del método de *wavelets* a cada una de estas perturbaciones sobre varias latitudes y longitudes sobre territorio mexicano.

2.7.1. Selección de EMC

Para cada uno de los dieciocho casos anteriores, se buscó su correlación con EMC ocurridas en el periodo señalado. Con la selección de los eventos anteriores, será posible correlacionar la ocurrencia de estos con las TG y PI observadas en el periodo de análisis de este trabajo. A partir del catálogo de EMC se recolectó y construyó una lista de todas aquellas eyecciones anuales ocurridas dentro del periodo considerado. De esta forma, es posible asociar, una o varias de estas EMC a las caídas del índice Dst para los periodos de análisis de este trabajo.

De este modo, para cada una de las tres bases de datos (2002, 2003 y 2004), se calculó el número total anual de EMC, tal como se muestra en la figura 2.5. Este gran número de EMC (varias de ellas importantes para el tema de perturbaciones ionosféricas) se redujo a través de un filtrado personalizado, a fin de conservar únicamente las EMC geoeffectivas (tipo Halo). El número de datos resultante fue considerablemente menor al original. Este filtro personalizado toma en cuenta las EMC con un ancho angular de 360° , en otras palabras, con CPA tipo Halo. Con los datos del Dst y este filtro se hizo posible afirmar que $\approx 3\%$ de las EMC anuales (para ese periodo) logran influir en el comportamiento de la magnetósfera terrestre.

Cabe mencionar que para llevar a cabo el filtrado, almacenaje y tratamiento de todos estos datos,

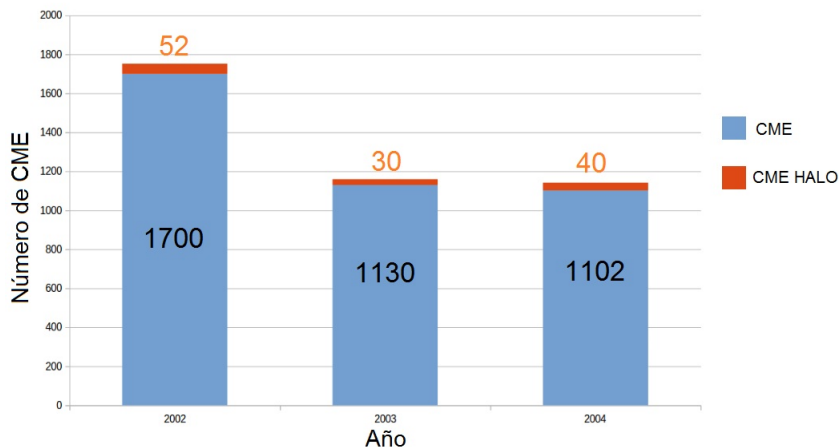


Figura 2.5: Histograma del total de EMC y EMC tipo Halo para cada uno de los años de estudio.

además de su graficación; se utilizó la hoja especializada de cálculo dentro del lenguaje MatLab.

2.7.2. Selección de Ráfagas Solares

Una historia similar, fue el tratamiento de la base de datos para el caso de las ráfagas solares. Esta base de datos contenía un número extremadamente mayor de elementos en comparación con la base de datos de EMC. Sin embargo, al no ser todas ellas de gran impacto para la ionosfera, se eligió filtrarlas por tipo de ráfaga M y X, es decir, las más intensas. Acción que redujo bastante la cardinalidad de la base.

El catálogo de ráfagas que se consideró en esta tesis es de carácter público y se encuentra disponible en la página <http://lasp.colorado.edu/home/see/>. Sus parámetros son; hora de inicio (*start*), hora final (*stop*) que corresponden a los valores de tiempo (TU) de ocurrencia, así como su localización en coordenadas de latitud y longitud sobre el disco solar y las regiones activas que lo produjeron (coordenadas de la mancha solar registradas por NOAA).

Una vez que se tienen identificadas las dieciocho fechas de una TG y sus respectivos eventos solares alrededor de estas, se utilizará el programa USTEC para descargar los valores GPS alrededor de estas tormentas y por ende, conocer el comportamiento ionosférico sobre varias estaciones.

2.8. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y su aplicación para la ionosfera

El Sistema de Posicionamiento Global o GPS (por sus siglas en inglés), consta de una red de satélites, todos ellos orbitando y monitoreando su posición alrededor de la Tierra, que hacen posible, entre otras cosas, la localización precisa de cualquier punto sobre la superficie terrestre en tiempo real. En principio, las posiciones se calculan mediante la distancia entre satélites en un proceso llamado *trilateración*. El tiempo que se tarda en transmitir la señal hasta la recepción de esta, multiplicada por la velocidad de la luz, hace posible obtener el rango o la distancia entre satélites. Al repetir este proceso en tres satélites, es posible determinar en dos dimensiones (longitud y latitud)

su posición en la Tierra. Al agregar un cuarto satélite a la red; se logra determinar una tercera dimensión (altura). Es decir, a mayor número de satélites, mayor es la precisión. La forma en que se encuentran distribuidos espacialmente aseguran que al menos cuatro de ellos estarán visibles a la latitud deseada.

Cuando estas señales electromagnéticas viajan a través de la ionosfera, pueden dispersarse a través de este medio que retarda la llegada de la señal a las estaciones fijas en Tierra. Al retrasarse la propagación de su señal, las mediciones de GPS sufren un aumento de fase. La diferencia entre el tiempo de emisión y el tiempo de recepción permiten obtener información sobre el comportamiento de la perturbación de distribución ionizada existente entre ambas entidades.

2.9. Formato RINEX

Hay diversos formatos de captura de la señal proveniente de GPSs. Particularmente el formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), es un formato desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna en 1989 para el intercambio y almacenamiento eficaz de estos datos GPS. Es además un formato estandarizado que permite un post-procesamiento para obtener resultados de menor incertidumbre o mayor precisión utilizando parámetros fundamentales de los sistemas de navegación como tiempo, fase y rango. Cabe mencionar que en ese proyecto estuvieron involucrados más de 60 receptores de GPS, de 4 distintos fabricantes (Gurtner & Lou (2007)).

Si bien este formato ha estado en constantes actualizaciones, la versión 3.0 es, en la actualidad, la más estable. Esta consiste en tres tipos (versiones previas como la 2.10 estaban compuestas hasta por seis tipos) de archivos ASCII: Observación, Navegación y Meteorológico. Con extensiones O, N y M respectivamente. Sin embargo, para fines de uso en el código actual, la versión 2.10 será la versión que utilizaremos, además de considerar sólo la constelación GPS, es decir, no consideraremos las constelaciones, Galileo, GLONASS, u otras.

Cada archivo RINEX cuenta con dos secciones: el encabezado; que es la primera sección, que proporciona una breve información sobre el contenido del archivo, adquisición de datos, versiones e información sobre la estación receptora. La segunda sección, contiene los datos a consultar como; posición, velocidad, frecuencia o alguna otra magnitud física relacionada, para cada uno de los satélites observados dependiendo de la tasa de adquisición del receptor.

Tanto el archivo de observación como el meteorológico contienen datos obtenidos de un solo sitio y de una sola sesión. Empero esto no quiere decir que la inclusión de datos de varias antenas no sea posible, sino que no es recomendable.

La figura 2.6 es un ejemplo de las dos secciones antes mencionadas. Dentro del encabezado se identifica toda la información principal de las observaciones mientras que sus respectivas frecuencias asociadas a diferentes intervalos de tiempo se encuentran espaciadas dentro de la sección de contenido y acomodadas por renglones. Este tipo de archivo puede ser generado cada 24 horas y es con estos valores de frecuencia con que se realiza el cálculo del TEC y posteriormente el del $\sqrt{\text{TEC}}$.

```

2.10      OBSERVATION DATA      G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
teqc 2000Jul20 Gordon Adams      20040319 05:18:54UTC PGM / RUN BY / DATE
Solaris 2.7|Ultra 2|cc SC5.0|+=-|*Sparc      COMMENT
teqc 2000Jul20 Chris Zhao      20021101 06:01:36UTC COMMENT
teqc 2000Jul20 CORS/NGS/NOAA      20020323 01:30:09UTC COMMENT
HP-UX 10.20|PA-RISC|cc A.10.32.03|+=|=|      COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION      COMMENT
ais1      MARKER NAME
xxx      MARKER NUMBER
CORS/NGS/NOAA      U.S. Coast Guard      OBSERVER / AGENCY
04952      ASHTECH Z-XII3 RD00      REC # / TYPE / VERS
11276      ASH700829.3      ANT # / TYPE
-2430153.1830 -2737194.0233 5205816.3326      APPROX POSITION XYZ
0.0000      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/I
1 1      WAVELENGTH FACT L1/L2
7 C1 L1 L2 P1 P2 D1 D2      # / TYPES OF OBSERV
30.0000      INTERVAL
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1-9]      COMMENT
L1: 1 -> 1; 90 -> 5; 210 -> 9      COMMENT
L2: 1 -> 1; 150 -> 5; 250 -> 9      COMMENT
teqc windowed: delta = 86400.000 sec      COMMENT
Forced Modulo Decimation to 30 seconds      COMMENT
Forced Modulo Decimation to 30 seconds      COMMENT
2002 3 22 0 0 0 30.0000000 GPS      TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
02 3 22 0 0 30.0000000 0 11G 3G 6G18G 2G26G17G10G23G22G21G15
22975535.6064 -2588096.18448 -1786755.13846 22975536.9274 22975549.1094
520.7874 405.8044
23013169.6784 39189768.50648 30543220.05546 23013171.4424 23013183.0444
-5859.7964 -4566.0694
21507580.0084 -4124246.09048 -2807736.10947 21507580.1564 21507588.1994
6.2994 4.9054
23913301.1124 1273893.20148 1015922.99246 23913300.8594 23913314.9824
-1167.6774 -909.8754

```

Figura 2.6: Ejemplo de la estructura del formato RINEX.

2.10. Cálculo del Contenido Total de Electrones o TEC

Para conocer el grado de perturbación en la ionosfera, es necesario calcular el Contenido Total de Electrones o TEC (por sus siglas en inglés). Cuando todas estas señales electromagnéticas viajan a través de la ionosfera, la cual es un medio dispersivo donde la refracción de las ondas depende de la frecuencia de las mismas, en el que el tiempo de retardo de las señales enviadas es proporcional al TEC a lo largo de la línea de la visual entre el receptor y el satélite.

Cabe mencionar que estas señales pueden perturbarse y para ver este efecto, se comenzará por estudiar el índice de refracción, el cual está dado por la ecuación:

$$n_{Iono} = 1 - \frac{c_2}{f^2}, \quad (2.2)$$

donde $c_2 = -40.3Ne$ y Ne representa la cantidad de electrones libres en la ionosfera y f las frecuencias del GPS. La refracción retrasa la propagación de la señal, provocando un retardo en las mediciones de código GPS y un aumento en la fase (Abidin Z. H. (1992)), para las dos frecuencias GPS ($k = 1, 2$).

$$I_k = -\frac{40.3}{f_k^2} \int Ne ds_0, \quad (2.3)$$

donde s_0 es la distancia geométrica a lo largo de la trayectoria satélite-receptor. Usando el diferencial de esta distancia, se puede encontrar el valor inclinado TEC o slant TEC (sTEC), definido

como:

$$sTEC = \int N_e ds_0 \quad (2.4)$$

En este caso ds_0 representa un cilindro con $1m^2$ de sección transversal que va desde el punto de transmisión de la onda, hasta la recepción de la misma en un satélite . Esta región encierra al TEC a lo largo de la trayectoria conocido como slant TEC o TEC inclinado. Su valor numérico se expresa en TECu (unidades TEC) lo que equivale a $1\text{ TECu} = 10^{16} e/m^2$.

Para poder estimar el sTEC en la relación entre el receptor y el satélite, se calcula el retraso sobre dos frecuencias (1575.42MHz y 1227.60MHz) mediante la combinación P4 (*Geometry Free Combination*) (Gende et al., (1998)):

$$P4 = P1 - P2 = -0.647I + c(\Delta b^{sat} - \Delta b_{rec}) \quad (2.5)$$

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 = +0.647I + B4, \quad (2.6)$$

donde $P1$ y $P2$ y $\Phi_{1,2}$ representan los pseudorangos y fases observables de las dos frecuencias. Δb^{sat} y Δb_{rec} son diferenciales de retraso del satélite y receptor llamadas DCB (*Differential Code Biases*), $B4$ es la fase de ambigüedad e I la refracción ionosférica ligada al sTEC (Klobuchar A. J. (1987)).

Este sTEC depende de la longitud de la trayectoria de la señal a través de la ionosfera y por tanto, de la elevación del satélite. Esto se corrige estimando el vTEC (vertical TEC) mediante el modelo de la figura 2.7. Cuyo modelo supone que todos los electrones libres se concentran en una capa con grosor infinitesimal a una altura H .

El vTEC es estimado para cada punto sobre una delgada capa infinitesimal a partir del ángulo z y z' (ver fig. 2.7) y la función de mapeo ionosférica MF_I :

$$MF_I(z) = \frac{STEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z'} \quad (2.7)$$

Con:

$$\sin(\cdot) = \frac{R_e}{R_e + H} \sin(z) \quad (2.8)$$

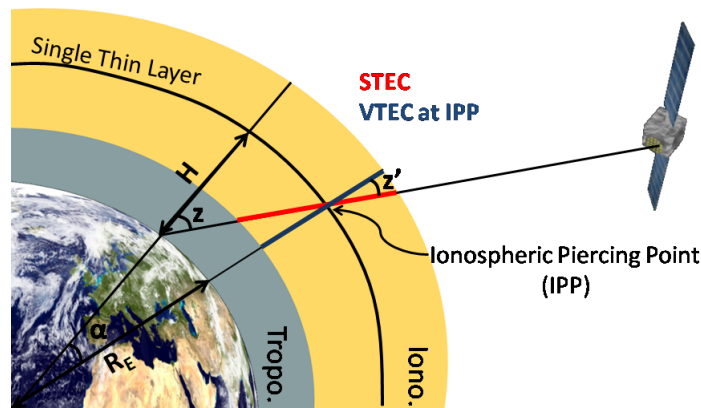


Figura 2.7: Modelo ionosférico de capa delgada y su relación con sTEC vs vTEC. Tomada de: http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php

Este vTEC sirve para calcular para el índice W, pero además con el pueden generarse mapas ionosféricos o mallas TEC aplicados en ciertas regiones terrestres que muestran los distintos niveles vTEC asociados a cada coordenada geográfica (ver fig. 2.8).

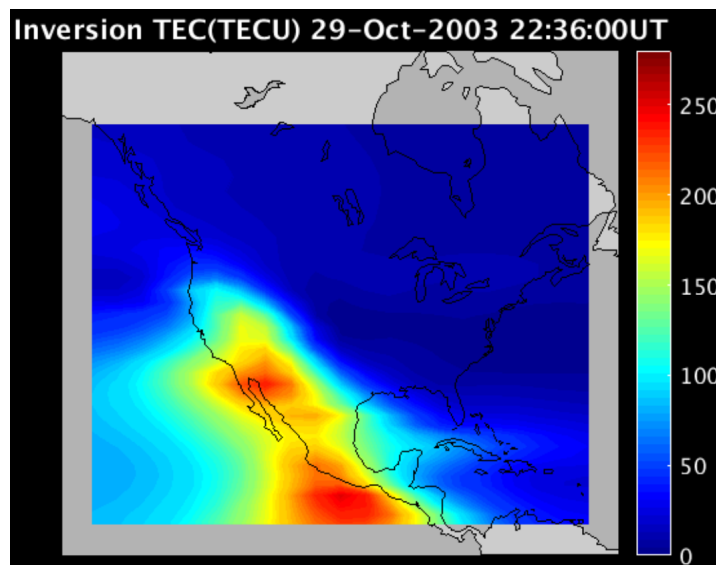


Figura 2.8: Mapa del TEC sobre la región centro y norte de América generado por el software *gmagic* durante la tormenta de *Halloween*.

2.11. Método de Wavelets en el lenguaje IDL

Para los fines de este trabajo, es de particular interés tomar la serie de tiempo TEC y aplicarle el método de *wavelets* para conocer, entre varias cosas, las frecuencias asociadas a las perturbaciones

ionosféricas observadas.

Se le conoce como *wavelet* a una función de minionda, es decir, funciones de onda con periodos de oscilación cortos ($A_i = A_f = 0$) o limitados en tiempo y frecuencia. Sus aplicaciones son muy variadas que van desde eliminar ruido, comprimir información, modular, filtrar, codificar, etc.

El análisis con el método de *wavelets* pretende descomponer una serie de tiempo en una serie de dimensiones tiempo-frecuencia dentro del mismo espacio. Esto permite obtener información tanto en amplitud de cualquier señal periódica como de su variación en el tiempo. La *wavelet* y la transformada de Fourier ambas pueden representarse como la suma de funciones senoidales. La transformada de Fourier es un caso particular de la *wavelet*. La principal diferencia entre ambas es que la *wavelet* lleva la serie de valores a la dimensión tiempo-frecuencia a diferente resolución⁴ (Mallat S. (1998)).

La función básica de *wavelet* tiene la forma:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} \exp^{i\omega_0\eta} \exp^{-\eta^2/2}$$

Esta función se define como el producto de una onda exponencial compleja y una Gaussiana. Donde Ψ es el valor de la *wavelet* en un tiempo η adimensional y ω_0 es el número de onda. Después, para cambiar el tamaño general, así como deslizar la *wavelet* a lo largo del tiempo, definimos las ondas de escala como:

$$\left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] = \left(\frac{\delta t}{s} \right)^{1/2} \omega \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right],$$

donde s y n son los parámetros para cambiar la escala y deslizarla en el tiempo, respectivamente. El factor $s^{-1/2}$ es una normalización para mantener la energía total de las ondas de escala.

Por último, dada una serie de tiempo X , y x_n sus valores con índice de tiempo n . Cada valor es separado en el tiempo por un intervalo constante de tiempo δt . La *wavelet* $W_n(s)$ es solo el producto interno (o convolución) de la función $\Psi_0(\eta)$ y la serie de tiempo.

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right],$$

donde Ψ^* significa el conjugado complejo. (Todas las ecuaciones fueron tomadas de: *A practical Guide to Wavelet Analysis* de Torrence Christopher⁵).

⁴Cantidad cuantificable de incertidumbre, derivada del principio de Heisenberg.

⁵<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>

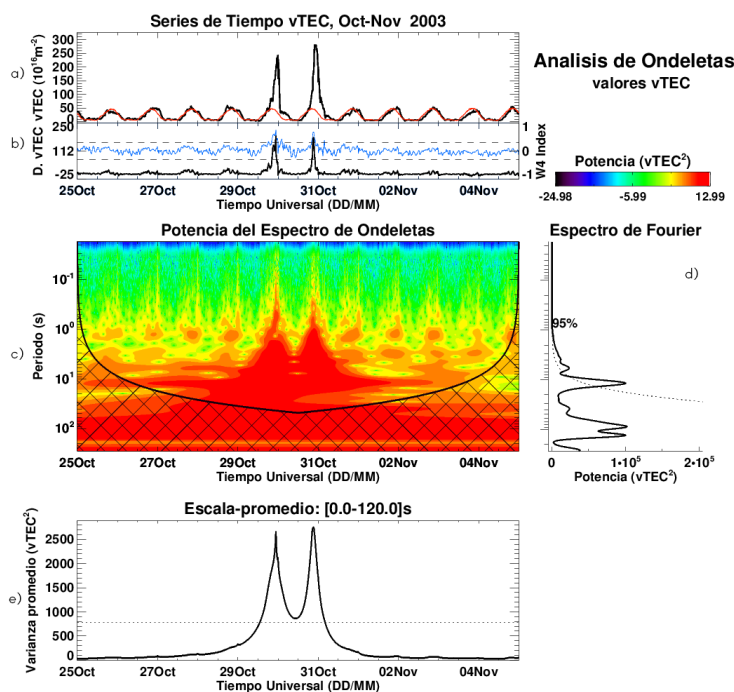


Figura 2.9: Ejemplo de cada uno de los paneles producidos por medio de la rutina del método de *wavelets* en IDL.

La rutina implementada en *python* para esta tesis, produce los cuatro paneles como los de la figura 2.9. El primer panel (de arriba hacia abajo) muestra dos series de tiempo; la variabilidad del TEC y una especie de ajuste por medio de la mediana mvTEC (panel a)). Debajo de ella (panel b)) la diferencia entre ambas series (serie de tiempo y ajuste) así como el índice *W* descrito en el capítulo 1. Después está el espectrograma de potencias (panel c)) donde existe un cono de significancia, en el que todas las escalas a distintos tiempos dentro del mismo, tienen significado estadístico para este trabajo, mientras que aquellas frecuencias que están fuera de dicho cono se descartan. Adicionalmente, la transformada de Fourier (panel d)) aplicada a la serie de tiempo sin tendencia y por último la varianza promedio (panel e)). Cabe mencionar que estos tres últimos paneles tienen a su vez un nivel de significancia del 95%.

Cabe resaltar que esta rutina fue tomada de: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/software.html> para el lenguaje de programación en IDL y posteriormente modificada acorde al tema central de esta tesis; el estudio de la ionosfera.

Capítulo 3

USTEC

Este capítulo describe los pasos implementados en las rutinas *gmagic* y *gplot* dentro del código USTEC y que pueden ser utilizadas por todo aquel usuario interesado en conocer el TEC sobre diferentes regiones del mundo. Es importante conocer desde la instalación de este programa hasta los parámetros que en él se seleccionan. Así como tener bien claro que se hará con los datos descargados, ya que las aplicaciones de este programa son muy variadas.

El programa *United States Total Electron Content* o USTEC es un producto de uso científico desarrollado para aplicaciones con frecuencias duales el cual está escrito en lenguaje de MatLab. Actualmente existen 80 CORS (*Continuously Operating Reference Stations*), 30 GPS/Met (redes meteorológicas de datos GPS) y 15 IGS (*International GNSS Service*) funcionando en el modelo. Particularmente se utiliza para calcular el *slant TEC* (sTEC) y *vertical TEC* (vTEC) en tiempo casi real sobre el territorio norteamericano o CONUS por sus siglas en inglés. Entre los principales colaboradores de este código se encuentran el *Space Weather Prediction Center* (SWPC), el *National Geodetic Survey* (NGS), el *National Geophysical Data Center* (NGDC) y el *Global System Division* (GSD). Actualmente colabora también el Servicio del Clima Espacial de México (SCiESMEX) con sede en el Instituto de Geofísica unidad Michoacán.

3.1. Código e Instalación

El código puede generar una gran diversidad de archivos de salida que van desde: mapas vTEC, mapas de Error (incertidumbre), mapas de tendencia basados en el promedio de días anteriores, archivos ASCII con datos vTEC y sTEC e incluso imágenes con las que se pueden desarrollar mapas en tiempo real para cualquier tipo de análisis.

Para obtener estos productos finales, es necesario verificar que los directorios se encuentren en la ruta correcta. En el caso de usar UNIX se edita el archivo de la ruta: (*./magicWorks/startup.m*) y se debe cambiar la ruta de la carpeta (*./magic/*) por la ruta en donde fue instalado el software.

Los pasos para correr el programa son:

1. Desde la terminal, se localiza la ruta de la carpeta *magicWorks* y se accede a ella.
2. Dentro de la terminal accedes al programa *MatLab*.

3. Dentro de la interfaz gráfica de MatLab tecleas el comando *gmagic* o *gplot* dependiendo de la paquetería que desees abrir:

Al final de estos tres pasos, una ventana como la de la figura 3.1 es generada por el programa MatLab que corresponde a una de las dos paqueterías importantes dentro del software de USTEC. Estas paqueterías fueron pieza clave para la elaboración de la tesis con las cuales se descargó y generó el vTEC para todas las fechas alrededor de las dieciocho tormentas geomagnéticas. A continuación se describen estas dos rutinas y los parámetros utilizados en MatLab dentro del código de USTEC en cada una de ellas.

3.2. Interfaz *gmagic*

El paquete *gmagic* fue desarrollado por Paul Spencer y evolucionó de investigaciones previas por Mitchell y Spencer (2002). Es reconocido como una herramienta de investigación diseñada para estudiar diversos enfoques al problema de obtener una estimación de la estructura ionosférica con suficiente precisión.

Por medio de esta paquetería, se descargan los archivos ASCII (ver sección 3.4) que contienen información útil sobretodo para usuarios GPS. Estos datos son obtenidos por estaciones GPS distribuidas a lo largo de Estados Unidos y parte de México con muy buena precisión utilizando como tipo de salida el formato RINEX. El principal procesamiento de datos utilizado por este código es el filtro Kalman.

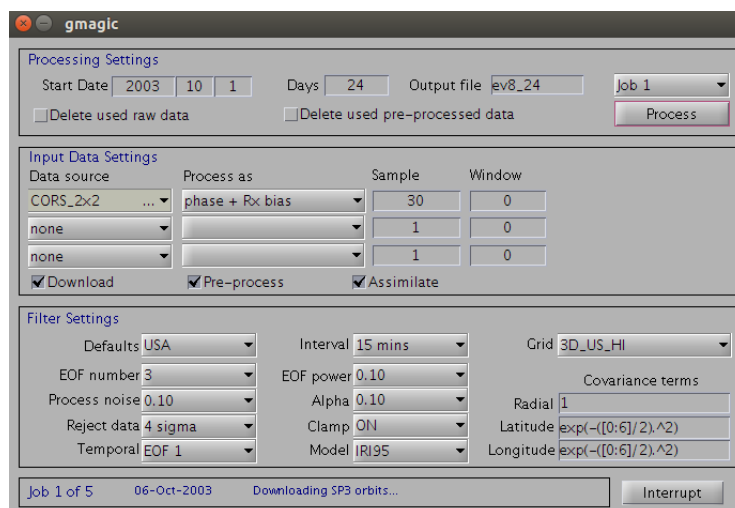


Figura 3.1: Interfaz gráfica del programa *gmagic*.

Los parámetros modificados en la interfaz (ver fig. 3.1) y con los cuales fue posible la descarga de los archivos con los que se calculó el vTEC para cada una de las dieciocho fechas fueron los siguientes:

1. *Processing Settings:*
2. *Start Date* > La fecha inicial (YY/MM/DD)

3. *Days >38* (5 días antes + día tormenta + 5 días después de la tormenta +27 días previos)
4. *Input Data Settings:*
5. *Data Source >Select List >CORS 2X2*
6. *Download, Pre-process, Assimilate >Todos seleccionados*
7. *Filter Settings:*
8. *Interval >15 mins* (Puede ser desde 2 hasta 60 minutos)
9. *Model >IRI95*

Este último, el *International Reference Ionosphere*, es un proyecto internacional patrocinado por el Comité de Investigaciones Espaciales (COSPAR) y la Unión Internacional de Ciencias de la Radio (URSI). Para la ubicación dada, la hora y la fecha, IRI proporciona promedios mensuales de la densidad de electrones, temperatura de electrones, temperatura de iones y composición de iones en el rango de altitud ionosférica (Bilitza D. et al., (1993)).

Una vez elegidos todos estos parámetros, se corre el programa con el botón *Process* el cual trabaja secuencialmente desde MatLab los tres procesos palomeados (*Download*, *Pre-process* y *Assimilate*). Esta acción generará una carpeta donde fue instalado el programa, la cual estará nombrada acorde a la previa decisión del usuario y será ahí donde se descarguen los 3648 archivos con extensión *.mat* (o más) correspondientes a los días seleccionados. Adicionalmente y dentro de esta misma carpeta, se generará un archivo cabecera que será utilizado por una segunda interface llamada *gplot*.

3.2.1. Filtro Kalman

Desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 (Welch & Bishop (2006)) es un procedimiento secuencial matemático para la asimilación de datos que opera a través de un mecanismo de predicción y corrección. Este es un procedimiento secuencial matemático que no solo logra asimilar una serie de datos sino que además pretende predecir valores posteriores a estos y corregir sus incertidumbres asociadas en un grado cada vez menor a partir de la estimación anterior agregando un término de corrección. En pocas palabras agrega una medición nueva y más precisa a la estimación anterior. Esto lo hace de forma sucesiva hasta que la incertidumbre se minimice estadísticamente y sin necesidad de los valores antiguos, es por eso que se le considera secuencial.

Este modelo según la documentación técnica de USTEC (US-TEC Technical Document (2004)) actualiza de forma óptima una solución de mínimos cuadrados al combinar un modelo dependiente del tiempo y otro previo de estimación. Este modelo utiliza varias matrices, entre ellas un vector x que guarda los valores TEC de la siguiente forma:

$$x = Ax^- + B,$$

donde x^- hace referencia al calculo TEC anterior. Además, las matrices A y B son construidas con el modelo de estimación, M , como sigue:

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

$$B_i = \alpha M_i^+$$

En estas ecuaciones, G es una matriz de correlación entre variables de estado espacialmente separadas y α es una constante.

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

$$K = PH^T(HPH^T + R)^{-1},$$

donde P representa la incertidumbre en el estado.

Por último, usando esta K , se actualizan el vector de estado y su covarianza.

$$x^+ = x + K(z - Hx)$$

$$P^+ = (I - KH)P$$

Este filtro forma parte de tres rutinas ejecutadas por el programa USTEC, específicamente dentro del proceso de asimilación¹ de datos.

3.3. Interfaz *gplot*

Una vez descargados los 3648 archivos con extensión `.mat` (a resolución de 15 minutos se generan 96 por día) provenientes de los 38 días considerados para cada evento, se corre el programa *gplot* desde la línea de comandos de MatLab. La figura 3.2 muestra la interfaz gráfica de esta paquetería. Su finalidad es recolectar los valores $vTEC$ de tipo INVERSION que se encuentran codificados dentro de los archivos con extensión `(.mat)` generados por *gmagic* en un formato de código binario. Todo esto se logra precisamente a través del archivo cabecera.

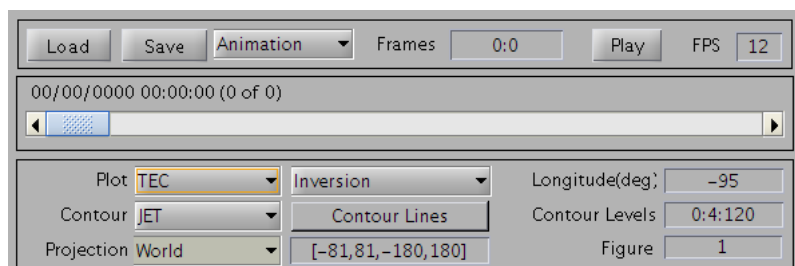


Figura 3.2: Interfaz gráfica del programa *gplot*.

¹Se le conoce como asimilación al proceso de combinar los resultados de un modelo determinado con los datos observados.

La rutina comienza al seleccionar la carpeta directorio (*LOAD*), donde se selecciona el archivo cabecera generado previamente por *gmagic*. Una vez seleccionado y cargado este archivo, el programa provee al usuario de un gráfico donde se visualiza el territorio a proyectar el vTEC. Después, dentro de la interfaz *gplot*, se seleccionaron los siguientes parámetros:

1. *Archivo >ASCII* (Puede ser: ANIMATION o IMAGES)
2. *Plot >TEC*
3. *Contour >JET*
4. *Projection >US(M)* (World, North, Atlantic, Europe,etc)
5. *TEC >INVERSION* (Error, Median diff, Model, Model diff)
6. *Contour Lines >Off*

Para finalizar la rutina seleccionamos el botón *SAVE*. De manera inmediata el programa genera el mismo número de archivos que los generados por *gmagic* pero ahora nombrados ITEC al inicio, que representa *TEC INVERSION*. Estos archivos son, en realidad, los valores vTEC. Todos ellos con extensión *.txt*.

Cabe mencionar que existe la posibilidad de obtener diferentes productos de salida modificando los parámetros anteriores. Una puede ser la creación de una película (.avi) con alguna región a mapear estática en el tiempo, mientras que el vTEC varía a frecuencias de 15 minutos sobre la región seleccionada. Otra, la creación de archivos con los errores (Etec) asociados a cada medición vTEC. Sin embargo, el resultado de estos dos productos no está plasmado en esta tesis.

3.4. Archivos ASCII

Este tipo de archivo que genera *gplot*, contiene datos vTEC en forma matricial bidimensional, como se muestra en la figura 3.3. En el primer renglón se muestran las longitudes (divididas por 10) hacia el oeste. Mientras que la primera columna indica las correspondientes latitudes (divididas por 10) hacia el norte.

	0	-1400	-1360	-1320	-1280	-1240	-1200	-1160	-1120	-1080	-1040	-1000	-960	-920	-880	-840	-800	-760	-720	-680	-640	-600
100	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4
115	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
130	7	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3
145	7	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3
160	7	6	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3
175	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3
190	6	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
205	6	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
220	6	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
235	6	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
250	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
265	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
280	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
295	5	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
310	5	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
325	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
340	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
355	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2
370	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
385	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
400	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
415	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
430	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
445	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
460	3	3	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
475	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
490	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
505	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
520	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
535	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
550	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
565	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
580	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
595	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2

Figura 3.3: Ejemplo de la matriz bidimensional y sus valores TEC (multiplicados por diez) dados por longitud (renglón) y latitud (columna) creada por el programa *gplot*.

Estos valores están dados en un rango de coordenadas de $[10, 59.5]$ de latitud y de $[-140, -60]$ de longitud donde cada valor representa el vTEC a la latitud y longitud correspondientes. Cabe mencionar que ese será el formato de salida para cada archivo que genera el programa *gplot*. Además, todos los valores dentro de esta matriz han sido multiplicados por un escalar de 10 unidades.

3.5. Mapeo TEC

Para conocer el comportamiento ionosférico sobre territorio mexicano se han considerado las coordenadas geográficas de 4 diferentes ciudades (Ensenada, Monterrey, Morelia y Mérida). Todas ellas se encuentran a diferentes latitudes, lo que permite hacer una mejor comparación del vTEC. Logrando así abarcar diferentes puntos sobre México. Las coordenadas correspondientes son las siguientes:

Ubicación	Latitud	Longitud
Morelia	$19^{\circ}46'06''N$	$101^{\circ}11'22''W$
Mérida	$20^{\circ}58'04''N$	$89^{\circ}37'18''W$
Monterrey	$25^{\circ}40'17''N$	$100^{\circ}18'31''W$
Ensenada	$31^{\circ}51'28''N$	$116^{\circ}36'21''W$

Tabla 3.1: Coordenadas geográficas de estaciones GPS mexicanas.

Una vez puntualizadas estas cuatro zonas referenciales en las que se quiere conocer el vTEC podemos acercarnos mediante la matriz del archivo ASCII a las latitudes y longitudes más próximas a estos cuatro puntos geográficos. Dicha aproximación se encuentra reflejada mediante cruces azules (ver mapa 3.4 mientras que las coordenadas exactas de las ciudades se encuentran representadas con diamantes rojos. De esta forma conoceremos el vTEC aproximado a estas cuatro ciudades.

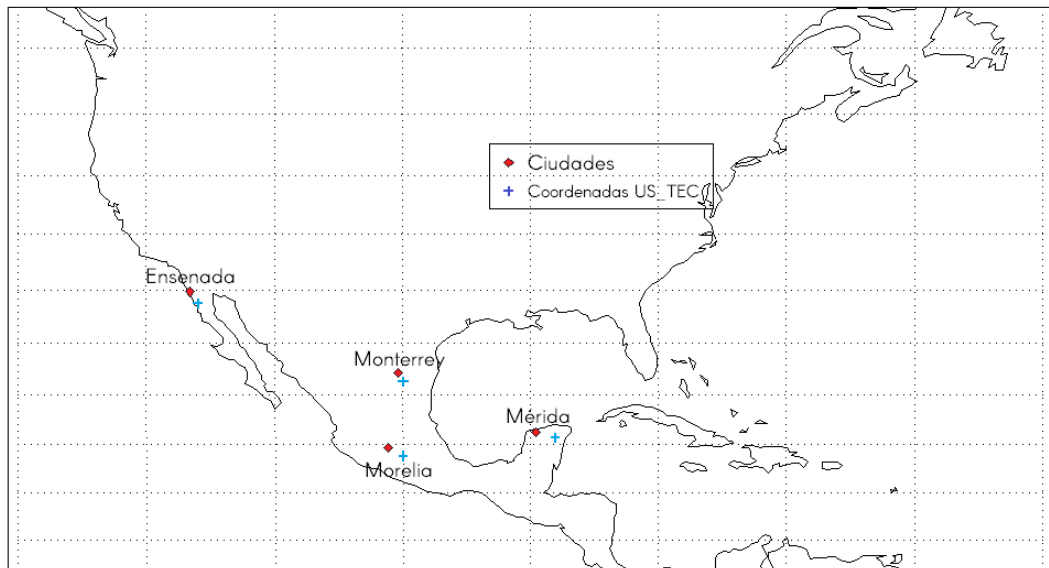


Figura 3.4: Mapa geográfico que muestra las coordenadas de ciudades a diferentes latitudes del territorio mexicano, así como de las coordenadas aproximadas tomadas del formato ASCII.

Estas rutinas son solamente el primer paso para el estudio de las perturbaciones ionosféricas ya que aún falta el procesamiento de todos estos valores. Posteriormente, con las coordenadas exactas de estas cuatro ciudades mexicanas y los valores $vTEC$ de las coordenadas aproximadas dentro de la matriz ASCII generada por *gplot*, es posible graficar la variabilidad ionosférica de cada una de las cuatro estaciones.

Posteriormente, se tomaron dos ciudades a las cuales se les aplicó el método de *wavelets*. Esto se hizo con los valores $vTEC$ de las coordenadas aproximadas del formato ASCII a la ciudad de Ensenada y posteriormente a las de Morelia. Esto, con la finalidad de comparar el comportamiento de la ionosfera sobre una latitud alta y una baja.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

En este capítulo se presentará el estudio realizado para las 18 tormentas geomagnéticas. En cada caso, se utilizó el código USTEC a lo largo de un periodo de tres años consecutivos (2002-2004) con la finalidad de comparar y caracterizar el comportamiento del vTEC durante eventos solares importantes que generaron perturbaciones ionosféricas en ese periodo sobre el territorio mexicano. Cabe mencionar que una de las tormentas geomagnéticas más intensas y estudiadas actualmente como referente, es la tormenta de *Halloween* del 2003. Dicha tormenta ocurre precisamente dentro del periodo de análisis de este trabajo, lo que permitirá tener un marco comparativo para el análisis de otros eventos en este periodo o incluso en futuros trabajos de investigación.

A lo largo del capítulo se explorarán las características generales de cada uno de los 18 eventos, así como los diferentes parámetros solares (EMC, ráfagas solares, viento solar) que pudieran haber provocado tales perturbaciones ionosféricas. Utilizando a la par, diferentes formas de visualización como: gráficas de vTEC, gráficas de *wavelets*, etc. Aplicando el análisis de *wavelets* a las diversas series de tiempo de vTEC (para Ensenada y Morelia), se encontraron diversos aspectos relacionados con la ionosfera sobre territorio mexicano. Este análisis se realizó con datos de 5 días antes y 5 días después del mínimo observado en el índice Dst, con la finalidad de observar las perturbaciones y compararla con periodos “quietos”. La idea de realizar estos análisis es estudiar el comportamiento de las perturbaciones que ocurren en la ionosfera.

4.1. Tormentas Geomagnéticas durante el año 2002

Primero se analizaron los eventos ocurridos durante el año 2002. Se encontraron ocho tormentas geomagnéticas con un índice Dst menor a los $-100nT$ que, dada la clasificación de tormentas vistas en el capítulo 1, corresponden únicamente a aquellos eventos más energéticos ocurridos en el Sol y que impactaron en el entorno terrestre, es decir, aquellos eventos que fueron geoeffectivos. Se encontró que tres de ellas ocurrieron en intervalos menores a un mes. Esto durante el periodo septiembre-octubre (véase tabla 2.2).

A continuación se presentan cada una de las tormentas geomagnéticas (TG) y las respectivas perturbaciones ionosféricas como consecuencia de éstas. Para esto, cada evento cuenta con diferentes tablas, donde se presentan propiedades generales tanto de las EMC como de las ráfagas solares que ocurrieron alrededor del valor mínimo de Dst en cada una de las fechas de análisis. Así mismo, se presentarán gráficos del vTEC tanto de una latitud alta, cercana a la ciudad de Ensenada

como de una latitud baja, cercana a la ciudad de Morelia (únicos dos puntos geográficos a los que se les aplicó el método de *wavelets* (ver sección 3.5).

Como se verá más adelante, la tormenta del 8 de septiembre (evento No. 6) fue la más intensa de este año.

4.1.1. Evento No.1: 20 de abril de 2002

Este primer evento se observó en el índice Dst alrededor del 20 de abril de 2002. La tabla 4.1 contiene información sobre tres EMC tipo Halo que tienen relación con la tormenta geomagnética observada en esa fecha, ya que al juzgar por la velocidad lineal de la primera EMC, le tomó poco más de dos días llegar a la magnetósfera terrestre (asumiendo que la Tierra se encuentra a $1 UA \sim 150 \times 10^6$ km). Lo anterior hace coincidir precisamente con la fase inicial de esta TG.

La tormenta geomagnética fue clasificada como intensa por alcanzar un valor mínimo Dst igual a $-149 nT$ el día 20 de abril a las 09:00 horas (TU). Sin embargo, el campo geomagnético comenzó a afectarse desde el 17 de abril, producto muy probablemente de la primera EMC mostrada en la tabla 4.1, que junto con el resto de las EMC provocó que este índice tomara valores negativos a diferentes lapsos y durante más de cuatro días. No fue sino hasta el 26 del mismo mes que el índice Dst comenzó a oscilar alrededor de $0 nT$, es decir, la fase de recuperación terminó 9 días después de registrarse la fase inicial de la TG.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
15/04/02	03:50:05	Halo (BA)	720	2.1	5.00E+030*2
17/04/02	08:26:05	Halo (OA)	1240	-19.8	—
21/04/02	01:27:20	Halo (OA)	2392	-1.4	—

Tabla 4.1: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de abril de 2002.

Adicionalmente, para el 21 de abril se identificó una ráfaga solar de tipo X1.5 a las 00:43 horas (TU). En la tabla 4.2 se pueden ver las características de este evento.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
21/04/02	00:43	X 1.5	-84	14	9906

Tabla 4.2: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 20 de abril de 2002.

Por otro lado, la gráfica 4.1, muestra el comportamiento del $vTEC$ a lo largo del tiempo para diferentes latitudes y longitudes sobre el territorio mexicano. Un aspecto importante que se observa de la misma, es que el $vTEC$ cambia considerablemente durante el periodo en el que ocurre la TG. Así por ejemplo, para la latitud cercana a la ciudad de Ensenada, (ver panel e)) de la gráfica 4.1), el $vTEC$ pasó de los $90 vTEC$ el día 17 de abril a reducirse casi a la mitad durante los tres días siguientes. Aunado a esto, los valores $vTEC$ para finales del día 21 de abril se mantuvieron debajo de las $70 vTEC$, es decir, una diferencia de $20 vTEC$ respecto a los días tranquilos. Por otra parte, a latitudes más bajas, como es el caso de la ciudad de Morelia (ver panel b) de la gráfica 4.1), el

vTEC fue de ≈ 91 vTEC mínimo, es decir, ligeramente mayor que en el caso de Ensenada. Esto se debe probablemente al efecto de que Morelia está más cercana a la región ecuatorial que Ensenada y es donde se encuentra la hoja de corriente terrestre. Adicionalmente, para cualquiera de las latitudes (ver paneles b), c), d), y e) de la figura 4.1), no se observó un incremento significativo en el valor del vTEC debido a la llegada de la ráfaga del día 21 de abril, es decir, no se observó un incremento en el vTEC al tiempo universal indicado en la tabla 4.2. Esto puede deberse a que este evento pudo haber impactado en otra zona de la ionosfera terrestre, pero no la que estaba en ese momento sobre el territorio mexicano.

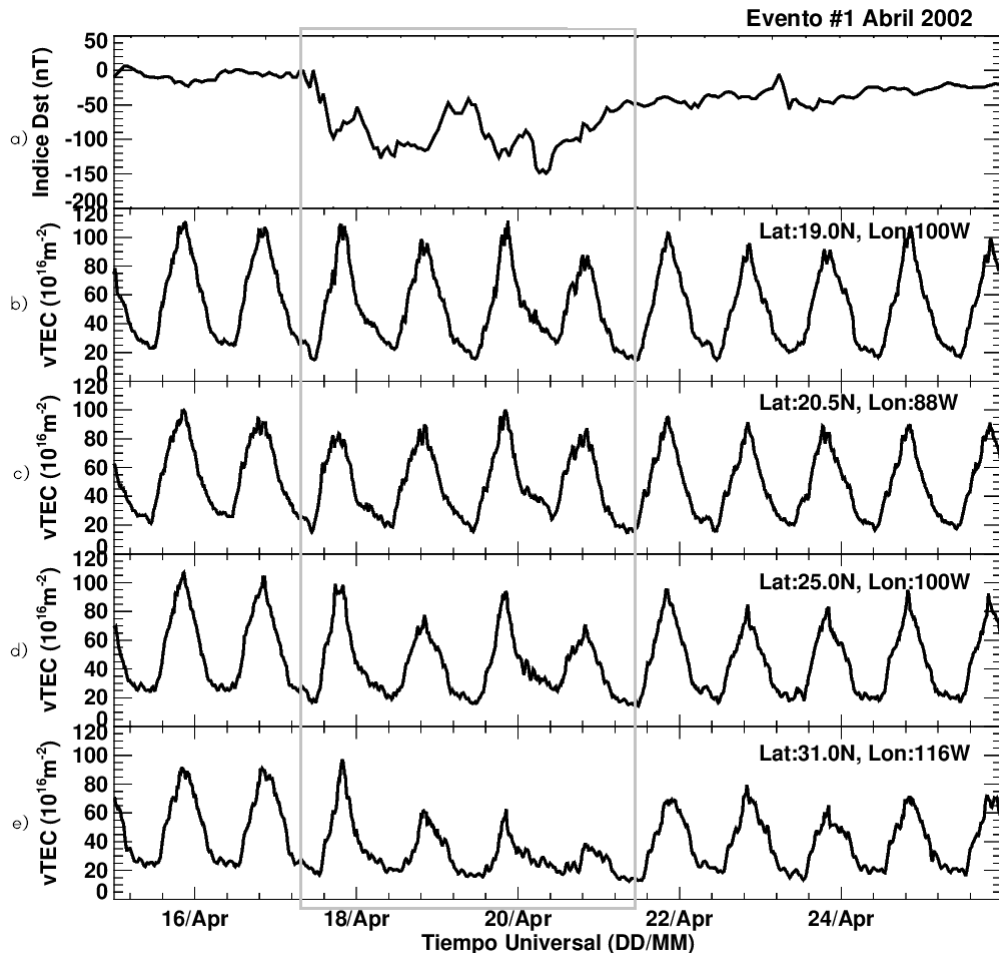


Figura 4.1: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #1 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

La gráfica 5.1 del apéndice muestra la variación del vTEC sobre Ensenada. En dicha gráfica se puede observar que para el periodo de análisis, el vTEC fue menor en comparación a su mediana vTEC (mvTEC) para los mismos días (18, 19 y 20 de abril), logrando diferencias de hasta 40 vTEC después del mínimo Dst (20 de abril). Además, el índice W (panel b) de la gráfica 5.1) indica un nivel mayor a 4 en varias ocasiones, lo que nos indica que se produjo una tormenta ionosférica intensa. En los paneles c) y d) de la misma figura se pueden observar las frecuencias características en esta serie de tiempo (vTEC).

Para el caso de Ensenada (ver apéndice 5.1, fig.5.1) se observa una frecuencia que sobresale

del 95 % de significancia y que está asociada directamente con la variación diurna del $vTEC$. Sin embargo, hay una frecuencia que está en el límite de significancia (se observa mejor en el caso de Morelia, apéndice 5.1, fig. 5.1) en este evento correspondiente a ~ 0.25 días, es decir, de aproximadamente 6 horas y que probablemente está asociada con las perturbaciones ionosféricas para ese periodo. Lo anterior se puede corroborar al observar el panel b) de la gráfica 5.1), donde precisamente se gráfica el índice W, que muestra un cambio significativo justamente alrededor del día 21 de abril.

Por último, la varianza promedio de la serie de tiempo para la ciudad de Morelia (ver apéndice 5.1, fig. 5.1e), sobrepasa al 95 % de significancia en tres ocasiones (125, 120 y $95 vTEC^2$). Esto indica en cierto modo que las perturbaciones observadas son consistentes con lo que se observa en el gráfico de *wavelets* y Fourier de esta misma figura.

4.1.2. Evento No.2: 11 de mayo de 2002

Para esta segunda tormenta del año 2002 se obtuvieron tres eyecciones tipo Halo (ver tabla 4.3). Todas ellas ocurrieron antes del mínimo valor Dst.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s^2]	E_k [erg]
06/05/02	13:50:05	Halo (BA)	627	-18.2	$6.40E+030*2$
07/05/02	04:06:05	Halo (S)	720	$158.2*1$	—
08/05/02	13:50:05	Halo (BA)	614	$78.9*1$	$1.10E+030*2$

Tabla 4.3: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 11 de mayo de 2002.

El índice Dst de esta tormenta apenas clasifica como intensa, esto tiene sentido al observar la tabla (4.3) que contiene velocidades de eyección bajas. Su fase inicial comienza a principios del día 11 de mayo, seguida de una caída abrupta que va desde cero a $-110 nT$ en tan solo 8 horas. Su fase de recuperación duró menos de dos días. Lo inusual de esta tormenta fue el menor TEC después del mínimo Dst sobre las cuatro ciudades (ver fig. 4.2) sobretodo para el caso de Mérida (ver 4.2c) donde la variación diurna del $vTEC$ del 12 de mayo llegó a tan solo $40 vTEC$. Mientras que para Morelia fue de $60 vTEC$ (ver 4.2b) y de $65 vTEC$ para Ensenada (ver 4.2e).

Al aplicar el método de *wavelets* sobre la serie $vTEC$ de Ensenada y Morelia (ver apéndice 5.1, fig. 5.2) solo la frecuencia diurna sobre Morelia rebasa el nivel de significancia (panel d)). Lo mismo para la varianza promedio (panel e)) en donde es rebasado este nivel justo el día en que el índice W clasifica con -4 a la tormenta. Esto a consecuencia de una diferencia casi $40 vTEC$ entre el $vTEC$ perturbado y el tranquilo (ver apéndice 5.1, fig. 5.2b).

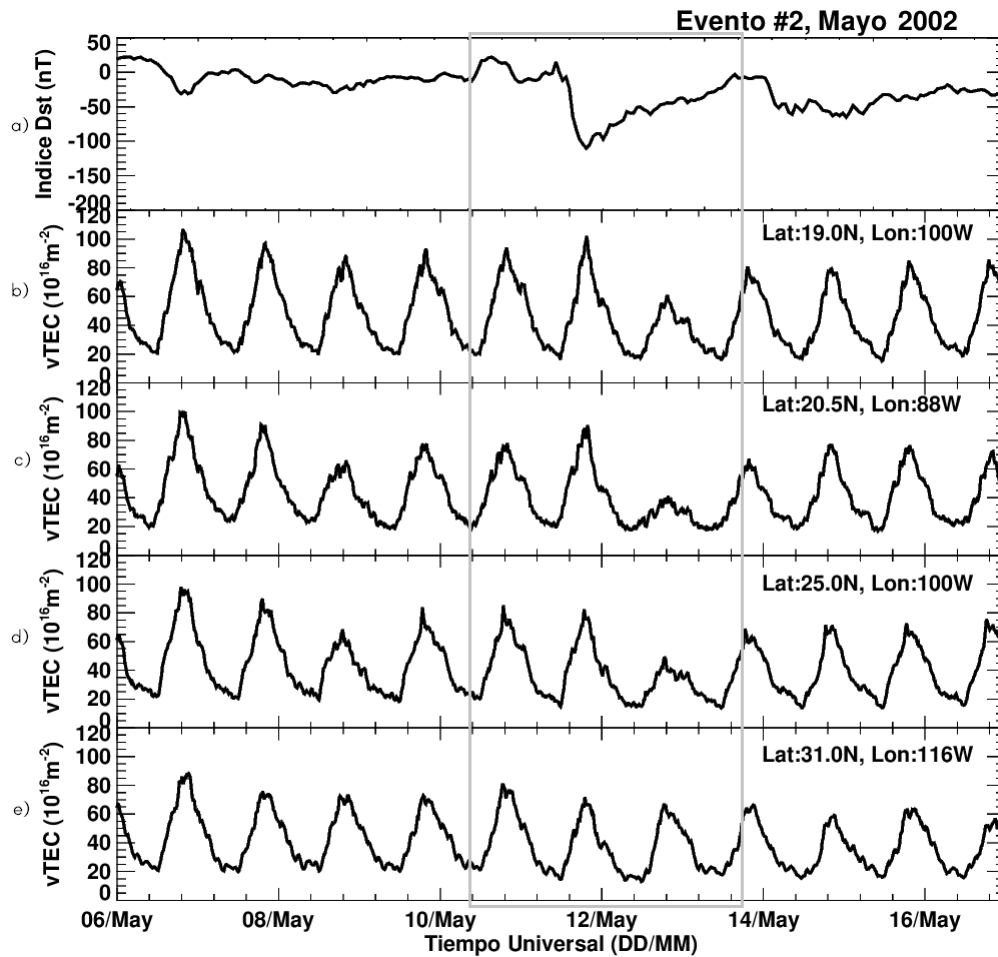


Figura 4.2: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #2 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

4.1.3. Evento No.3: 23 de mayo de 2002

Para esta tercer tormenta, al menos una eyección y una ráfaga solar fueron encontradas dentro del filtro de datos de la actividad solar para esta fecha (tablas 4.4 y 4.5 respectivamente).

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
22/05/02	03:50:05	Halo (BA)	1557	-10.4	—

Tabla 4.4: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 23 de mayo de 2002.

Al graficar el índice Dst y el TEC de los días cercanos a la tormenta se obtienen las gráficas de la figura 4.3. Su fase inicial comienza el día 11 de mayo a las 08:00 horas (TU), después de un pequeño pico de $15nT$ comienza a descender hasta el mínimo valor de $-110nT$ el mismo día a las 20:00 horas (TU). Inmediatamente después comienza su fase de recuperación, la cual fue lenta y constante (fig. 4.3a) con una duración menor a los dos días.

Fecha	Hora (TU)	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
DD/MM/AA	HH:MM				
21/05/02	21:20	M 1.5	38	-17	9960

Tabla 4.5: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 23 de mayo de 2002.

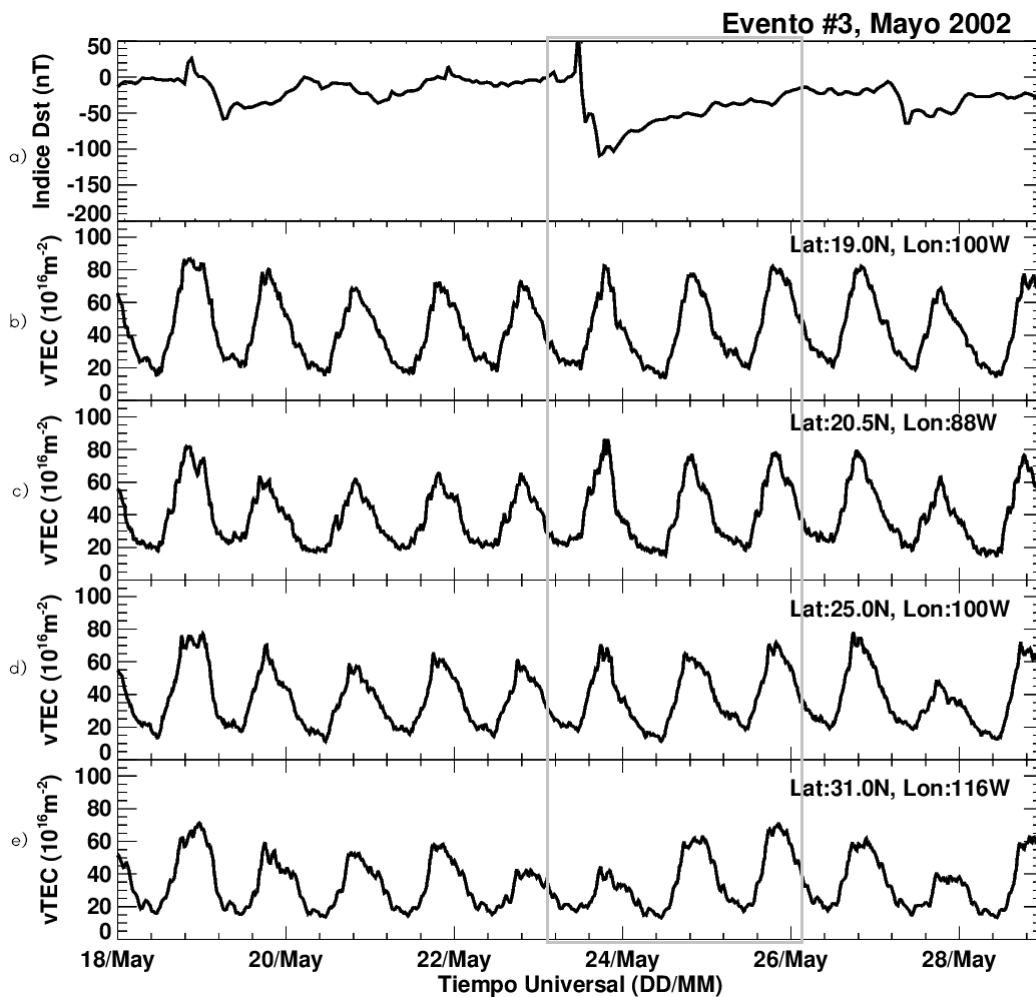


Figura 4.3: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #3 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Respecto a la variabilidad ionosférica, la latitud de Ensenada parece ser la más afectada de las cuatro (véase fig. 4.3e) en comparación con los días anteriores, sin embargo esto se reflejará mejor a través del método de *wavelets*.

La gráfica de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.3) muestra un análisis del vTEC y mvTEC de Ensenada y Morelia. En la mayoría de días mvTEC queda por arriba del TEC perturbado. Esto provoca que el índice W sea de -0.322 para el caso de Ensenada (ver apéndice 5.1, fig. 5.3b). Aunque en ningún caso las frecuencias del espectro de Fourier logran rebasar el nivel de

significancia, al menos para frecuencias diferentes a la variación diurna (ver apéndice 5.1, fig. 5.3d).

4.1.4. Evento No.4: 21 de agosto de 2002

Para el caso de esta tormenta se identificó mayor actividad solar que en la tormenta anterior. No solo por las tres eyecciones tipo Halo con velocidades altas (tabla 4.6), sino además tres ráfagas solares de diferente clase (tabla 4.7).

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
16/08/02	12:30:05	Halo (BA)	1585	-67.1	—
22/08/02	02:06:06	Halo (OA)	998	-32.8	—
24/08/02	01:27:19	Halo (OA)	1913	43.7	—

Tabla 4.6: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 21 de agosto de 2002.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
19/08/02	20:56	M 3.1	-33	11	69
20/08/02	08:22	M 3.4	-38	10	69
21/08/02	05:28	X 1.0	-51	12	69

Tabla 4.7: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 21 de agosto de 2002.

Todo lo anterior se refleja en el índice Dst de la figura 4.4a. La fase inicial de este índice llegó a valores positivos ($20nT$) el día 18 de agosto a las 20:00 (TU) y se mantuvo oscilando alrededor del $-50nT$ por varios días. Además, su fase de recuperación termina hasta finales del día 22 donde el índice registró $-10nT$.

Por otra parte, las perturbaciones en la variación diurna $vTEC$ sobre las cuatro ciudades no parecen muy afectadas (ver gráfica 4.4) en comparación con los dos casos anteriores. Para el índice W, ninguna de las dos series logra clasificar como tormenta -4 (ver apéndice 5.1, fig. 5.4b). Sin embargo, cuando añadimos $mvTEC$ en la gráfica de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.4e) la diferencia entre $vTEC$ y $mvTEC$ es notable. En ambas latitudes la frecuencia *1 dia* rebasa el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.4d) y solo para Morelia apenas toca este nivel en la varianza promedio (ver apéndice 5.1, fig. 5.4e).

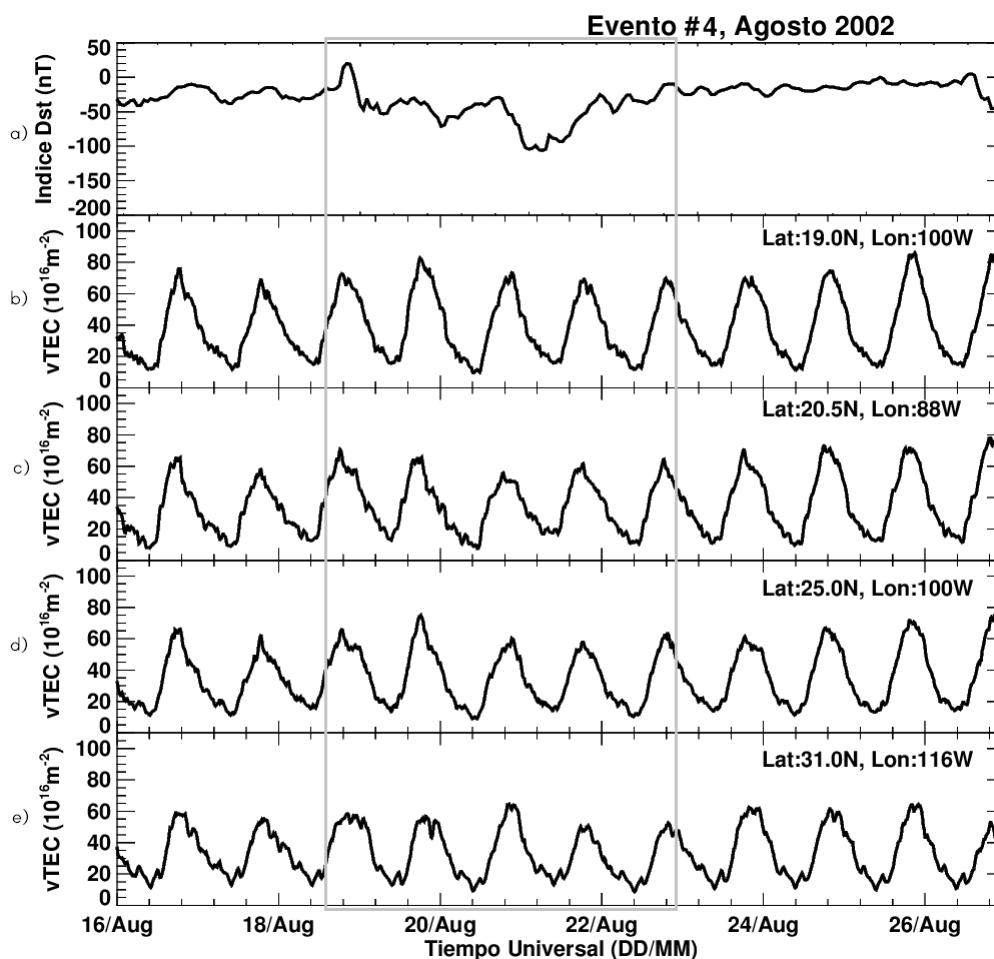


Figura 4.4: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #4 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

4.1.5. Evento No.5: 4 de septiembre de 2002

Para esta tormenta no se tienen registros de EMC alguna, solo una ráfaga solar tipo M (tabla 4.8).

Fecha	Hora (TU)	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
DD/MM/AA	HH:MM				
09/09/02	17:40	M 2.1	-54	-9	105

Tabla 4.8: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 4 de septiembre de 2002.

Esta tormenta geomagnética ocurre a principios de septiembre de 2002. Sin embargo se puede considerar su fase inicial desde las primeras horas del 3 de septiembre, donde el índice Dst tomó valores positivos de hasta $22nT$. Después tuvo una caída bastante abrupta (gráfica 4.5a) con un valor mínimo Dst de $-109nT$ para el día 4 de septiembre a las 06:00 horas (TU). Durante los dos

días posteriores comienza a elevar sus valores.

Cabe señalar que cuatro días después de esta tormenta ocurre otra más, que corresponde al sexto evento del cual hablaremos más adelante.

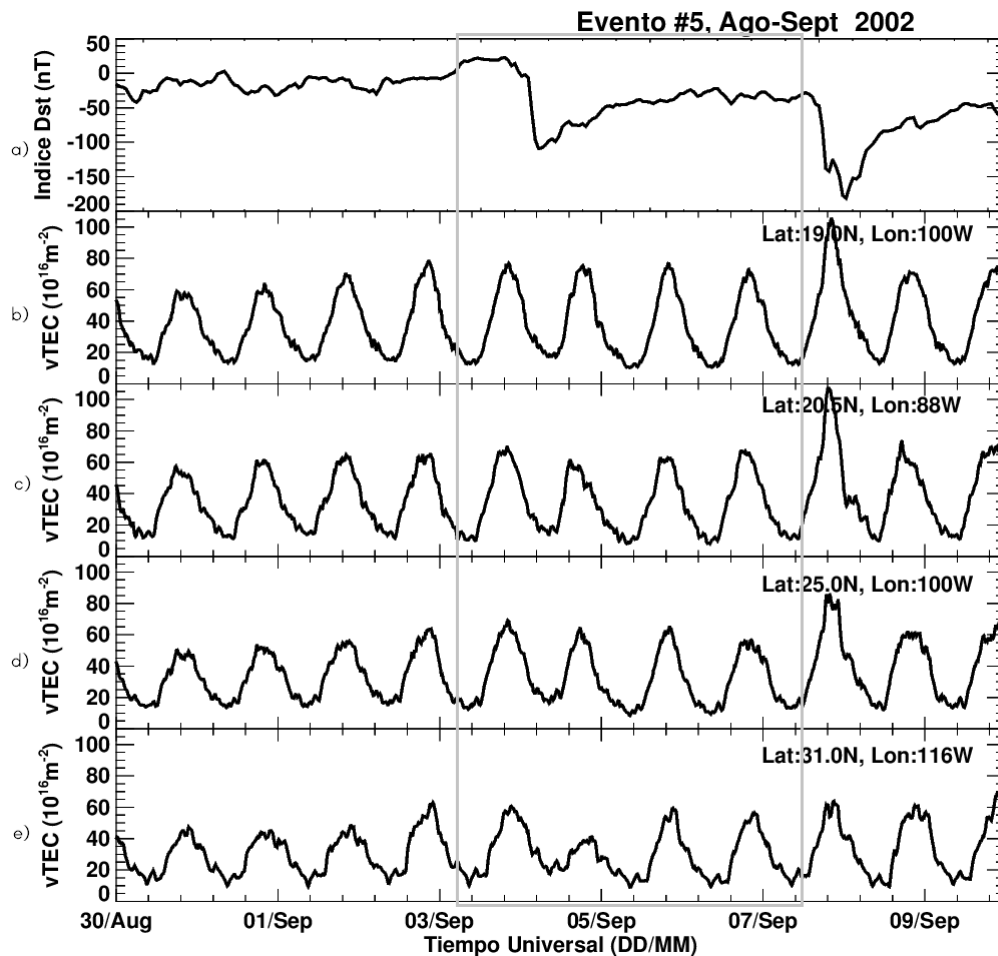


Figura 4.5: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #5 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

La variación del vTEC presenta cambios poco visibles en algunas de las cuatro coordenadas graficadas durante este periodo de tiempo (ver fig. 4.5). Por ejemplo, el contenido de electrones sobre la ionosfera a partir del 30 de agosto va en aumento para todas las latitudes. Mientras que el mínimo de vTEC ocurre posterior al mínimo Dst. Por ejemplo, para Ensenada (ver fig. 4.5e) fue de 40vTEC cuando la variación diurna previa osciló entre las 60vTEC .

En el método de *wavelets* para la ciudad de Ensenada la perturbación ionosférica comienza a tomar lugar desde la cuarta variación diurna (ver apéndice 5.1, fig. 5.5a) aunque su diferencia con mvTEC no presenta valores altos, tampoco en el índice W (ver apéndice 5.1, fig. 5.5b). Si a esta diferencia le aplicamos la transformada de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.5d) se aprecia muy levemente una frecuencia por arriba del nivel de significancia de alrededor de 1 día . Los valores de la última gráfica, asociados a la varianza promedio no rebasan el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.5). En caso similar, Morelia presentó una variación diurna vTEC diferente a

mvTEC a partir del 2 de septiembre (ver apéndice 5.1, fig. 5.5a), inclusive la variación vTEC del 4 de septiembre parece desfasada con respecto a mvTEC y logra salirse del nivel de significancia también (ver apéndice 5.1, fig. 5.5e) al graficar la varianza promedio. Esto provoca una diferencia notable en la misma gráfica 5.5 pero panel b) pero aún así el índice W sigue sin reportarla como una tormenta intensa. La ondeleta es diferente que la de Ensenada (ver apéndice 5.1, fig. 5.5c) principalmente por la tormenta del día 8 de septiembre.

4.1.6. Evento No.6: 8 de septiembre de 2002

Sin duda alguna las dos eyecciones de la tabla 4.9 produjeron una firma bastante característica en el índice geomagnético el día 8 de septiembre.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
05/09/02	16:54:06	Halo (OA)	1748	43	—
06/09/02	13:31:49	Halo (BA)	909	0.2	7.30E+031

Tabla 4.9: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 8 de septiembre de 2002.

Esta tormenta, aunque parecida en su fase de caída a la anterior, se le atribuyen fenómenos diferentes. Su fase inicial ocurrió el día 7 de septiembre a las 19:00 horas (TU), donde se tienen valores Dst de aproximadamente $-40nT$ hasta alcanzar el mínimo de $-181nT$ en menos de 10 horas (véase fig. 4.6a). Posterior a este mínimo Dst, en la fase de recuperación, el índice no presentó recaídas, por lo que esta fase fue más rápida que el caso anterior. Si bien el Dst no alcanzó valores cercanos a cero, la ionosfera recuperó sus valores vTEC normales hasta el día 16 de septiembre que fue por alrededor de los $70vTEC$ para latitudes bajas y de poco más de $60vTEC$ para latitudes más altas, es decir 8 días después del valor mínimo. Aunado a esto, la ionización de electrones fue mayor a latitudes menores, alcanzando valores de $105vTEC$ para el caso de Morelia y $110vTEC$ para Mérida (gráficas 4.6b y 4.6c). Mientras que a latitudes poco más altas como las de Monterrey (gráfica 4.6d) no existió concentración de electrones a más de $85vTEC$ y para el caso de Ensenada (véase fig. 4.6e) el vTEC no presentó perturbación significativa mayor a $70vTEC$.

En el caso de Ensenada, el ajuste por medio de mvTEC se encuentra por debajo de los valores vTEC correspondientes (ver apéndice 5.1, fig. 5.6b). Esto se traduce a una mayor cantidad de ionización en la ionosfera. Aunque ni la diferencia ni el cociente (índice W) entre ambos valores no presenta cambios importantes. En el espectro de *wavelets* se logran observar pequeñas manchas rojas por arriba del cono (ver apéndice 5.1, fig. 5.6c) que apenas sobrepasan el nivel de significancia en el espectro de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.6d) al nivel de 0.15 de frecuencia. Al igual que la tormenta anterior se observan varios valores máximos pero ninguno de ellos sobrepasa el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.6e).

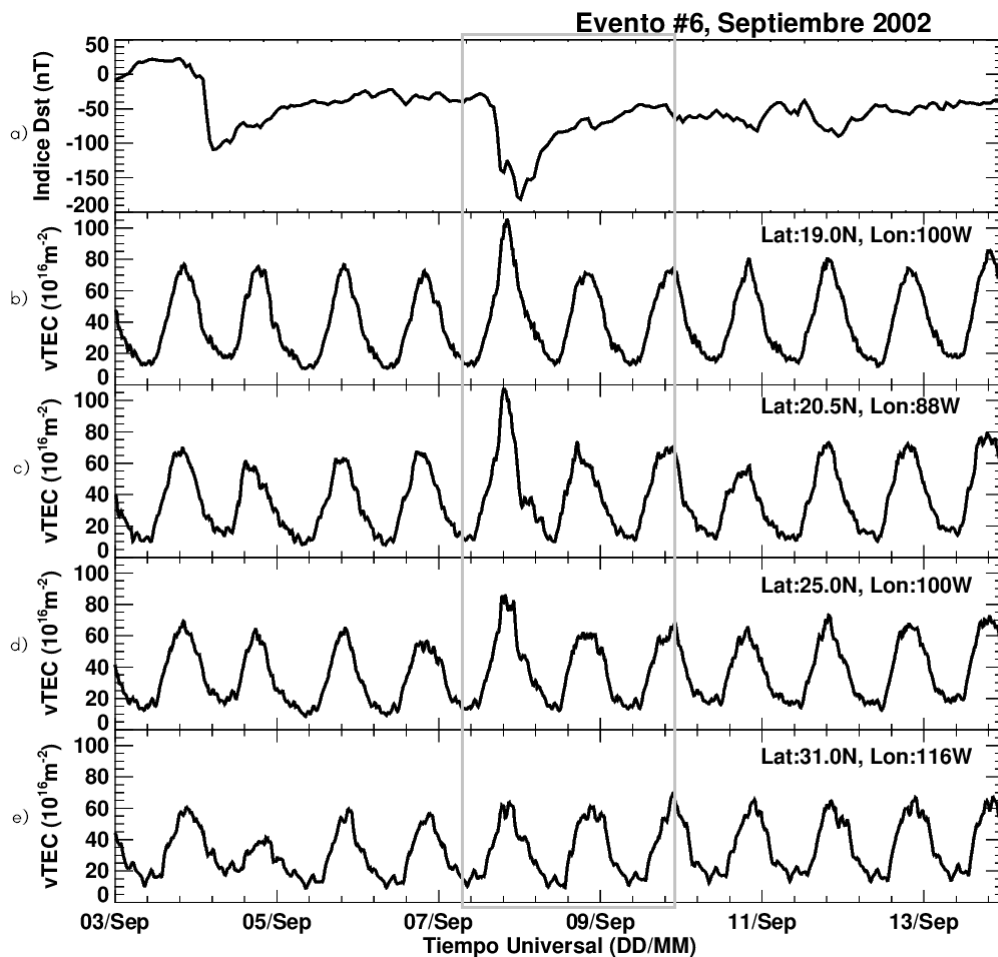


Figura 4.6: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #6 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Al considerar el comportamiento de la mvTEC sobre la ciudad Morelia (ver apéndice 5.1, fig. 5.6a), se puede observar que la diferencia entre vTEC y mvTEC es apreciable sobretodo para las fechas como el 4 (evento No. 5) y 7 de septiembre, que corresponde al mínimo Dst. Donde el valor de la diferencia es de 45 unidades TEC aproximadamente (ver apéndice 5.1, fig. 5.6b). Estas dos diferencias (vTEC y mvTEC) generan potencias destacables sobre el espectro de *wavelets* como el que muestra la gráfica 5.6c, donde la transformada de Fourier verifica una sola frecuencia diurna por arriba del cono de influencia y es cercana a 1 (ver apéndice 5.1, fig. 5.6d). Mientras que el valor 2-sigma es igual a 85.954974 y la varianza tiene máximos de 90 y 160 $vTEC^2$, que corresponden a los dos máximos por arriba del nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.6e).

4.1.7. Evento No.7: 1 de octubre de 2002

No se encontró relación con algún EMC o ráfaga solar. Esta tormenta comenzó justo a finales del mes de septiembre (ver fig. 4.7a). Desde entonces se produjeron dos tormentas intensas (ver fig. 4.7a), las cuales se tomarán como una sola por su cercanía. La primera de ellas alcanzó valores en el índice geomagnético más bajos que en la segunda. Estos valores fueron de $-176 nT$ para el

día 1 de octubre a las 17:00 horas (TU) y de $-125 nT$ para el 4 de octubre a las 01:00 horas (TU). Cabe mencionar que la fase de recuperación del primer mínimo termina el 3 de octubre a las 10:00 horas con $-45 nT$ en el índice Dst, es decir, una duración de 40 horas aproximadamente, es decir, menos de dos días. Aunque los valores menores a cero en el Dst prevalecen a lo largo de todo el mes.

En el caso de la ionosfera, la gráfica 4.7 muestra que la perturbación se vuelve cada vez mayor a medida que la latitud crece. En particular, esta gráfica corresponde a la variación diurna sobre Ensenada, muestra una perturbación mayor a las otras tres, en especial la sexta variación diurna, cuyo valor $vTEC$ es de $34 vTEC$ mientras que para latitudes más bajas como las de Morelia, la misma variación tiene un valor por arriba de las $60 vTEC$. Posterior a este periodo se pueden observar distintas perturbaciones ionosféricas que corresponden al paso de la subtormenta.

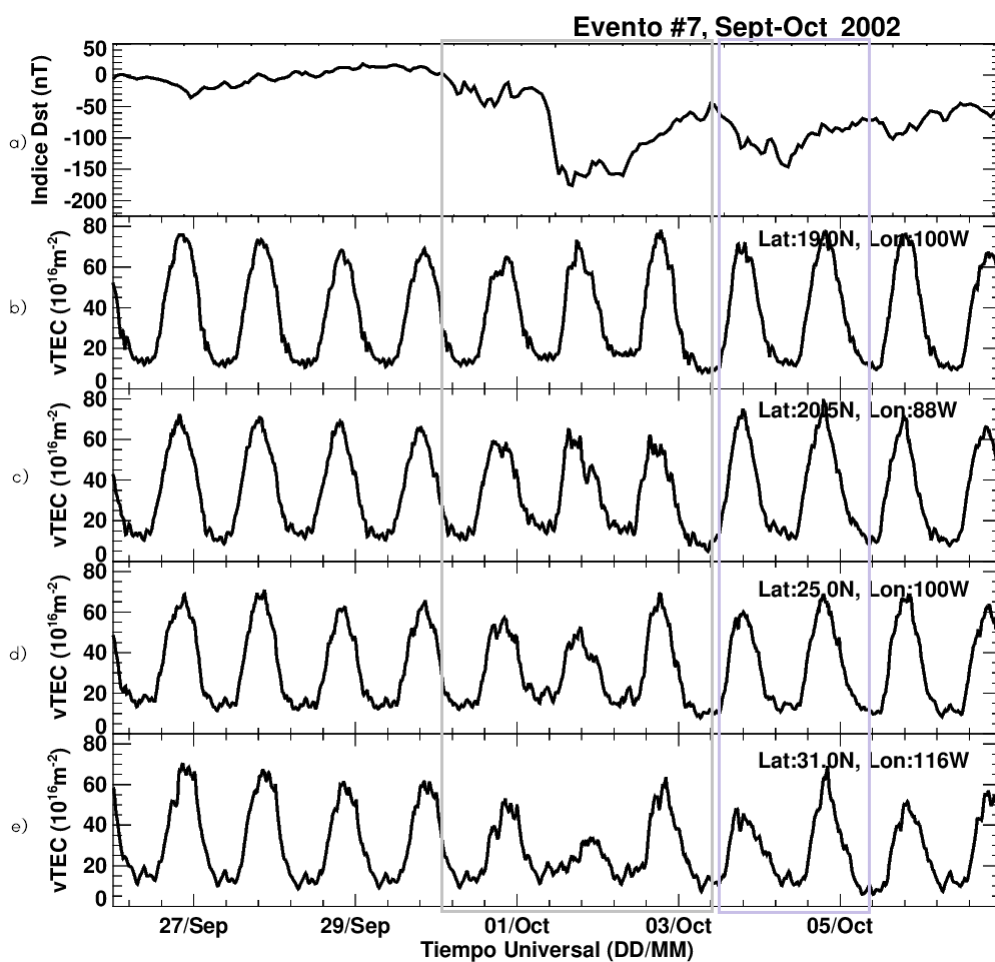


Figura 4.7: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o $vTEC$ para el evento #7 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

A partir de la gráfica 5.7a del apéndice 5.1 se observa no solo un TEC menor con respecto a $mvTEC$ para finales del día 30 de septiembre, sino que aparentemente existe un desplazamiento horizontal que va desde el 1 hasta el 3 de octubre. Además, la diferencia entre $vTEC$ y $mvTEC$ es más oscilante durante estas fechas, aún y cuando solo lograr variar por $10 vTEC$.

Por último, el espectro de *wavelets* nos ofrece un panorama en el que las potencias mayores se concentran a partir del 30 de septiembre. Esto se puede traducir en la pronunciación de un pico dentro del espectro de Fourier de una frecuencia de 1 *días* (ver apéndice 5.1, fig. 5.7)d. Mientras que la línea de 95 % o dos-sigma se encuentra a 79.694526 y dos máximos en la varianza promedio de 110 y 125 (ver apéndice 5.1, fig. 5.7)e.

Aún y cuando solamente se logran apreciar cambios relevantes en el comportamiento diurno ionosférico a latitudes altas en comparación de latitudes bajas (ver gráfica 4.7), el ajuste entre el $vTEC$ y la respectiva $mvTEC$ de Morelia parece desfasado horizontalmente (ver apéndice 5.1, fig. 5.7a) justo en el sexto y séptimo pico (de izquierda a derecha), lo que provoca una diferencia significativa (ver apéndice 5.1, fig. 5.7b) justo el día del mínimo Dst. Esto tiene un impacto mayor al analizar los datos con el método de *wavelets*, ya que se logra apreciar una mayor concentración de potencias (ver apéndice 5.1, fig. 5.7c) justo después del mínimo Dst. Adicionalmente, el espectro de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.7d) contiene, además de la frecuencia diurna, logra destacar una leve frecuencia de alrededor de 0.5 *días*. En el último panel (ver apéndice 5.1, fig. 5.7e) la varianza promedio logra rebasar el nivel de significancia durante un largo periodo de tiempo, área que corresponde a las potencias más visibles en espectro de *wavelets*.

4.1.8. Evento No.8: 21 de noviembre de 2002

Al igual que el evento No.7, no se encontraron EMC o ráfagas tipo M o X alrededor de esta tormenta del 21 de noviembre.

Esta fue la última de las TG intensas del año 2002 y tuvo lugar desde el día 20 de noviembre, donde el Dst tuvo un singular comportamiento; al observar la gráfica 4.8a se puede apreciar un pequeño decaimiento de $-87 nT$ a las 21:00 horas (TU), seguido de un máximo de $-6 nT$ el día 21 de noviembre a las 03:00 horas (TU). Ocho horas después el Dst registró el segundo mínimo con valor de $-128 nT$ a las 11:00 horas (TU). Le tomó aproximadamente cinco días a la fase de recuperación, es decir, hasta el día 26 de noviembre el Dst alcanzó valores cercanos a cero. Respecto a la variación ionosférica a diferentes latitudes se hace necesario comparar el comportamiento $vTEC$ perturbado con respecto a $mvTEC$ al menos en las tres primeras latitudes, ya que no se aprecia a ver una perturbación significativa. Sin embargo, en latitudes altas como Ensenada (fig. 4.8e) claramente se puede observar que el quinto y sexto pico (de izquierda a derecha) tienen valores $vTEC$ diferentes con respecto a sus alrededores. El primero con un valor alrededor de $70 vTEC$ y el segundo menor de $40 vTEC$.

Una vez que introducimos $mvTEC$ de una rotación solar previa para el caso de Ensenada, el índice W (ver apéndice 5.1, fig. 5.8b) interseca en distintas ocasiones la línea de clasificación W4, eso es de llamar la atención ya que lo hace aún y cuando no existe una diferencia importante entre el $vTEC$ y $mvTEC$. Únicamente la clasificación W4 tiene sentido el día 21 de noviembre, que es justo cuando la diferencia entre ambos valores es mayor (ver apéndice 5.1, fig. 5.8a).

Al aplicar el método de *wavelets* a la diferencia entre $vTEC$ y su media (ver apéndice 5.1, fig. 5.8c) no se producen potencias que logren destacarse en el espectro de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.8d) por arriba del nivel 95 % de significancia. Similar al caso de latitudes bajas, la varianza promedio (ver apéndice 5.1, fig. 5.8e) rebasa el nivel de significancia del 95 % el día 21 de noviembre.

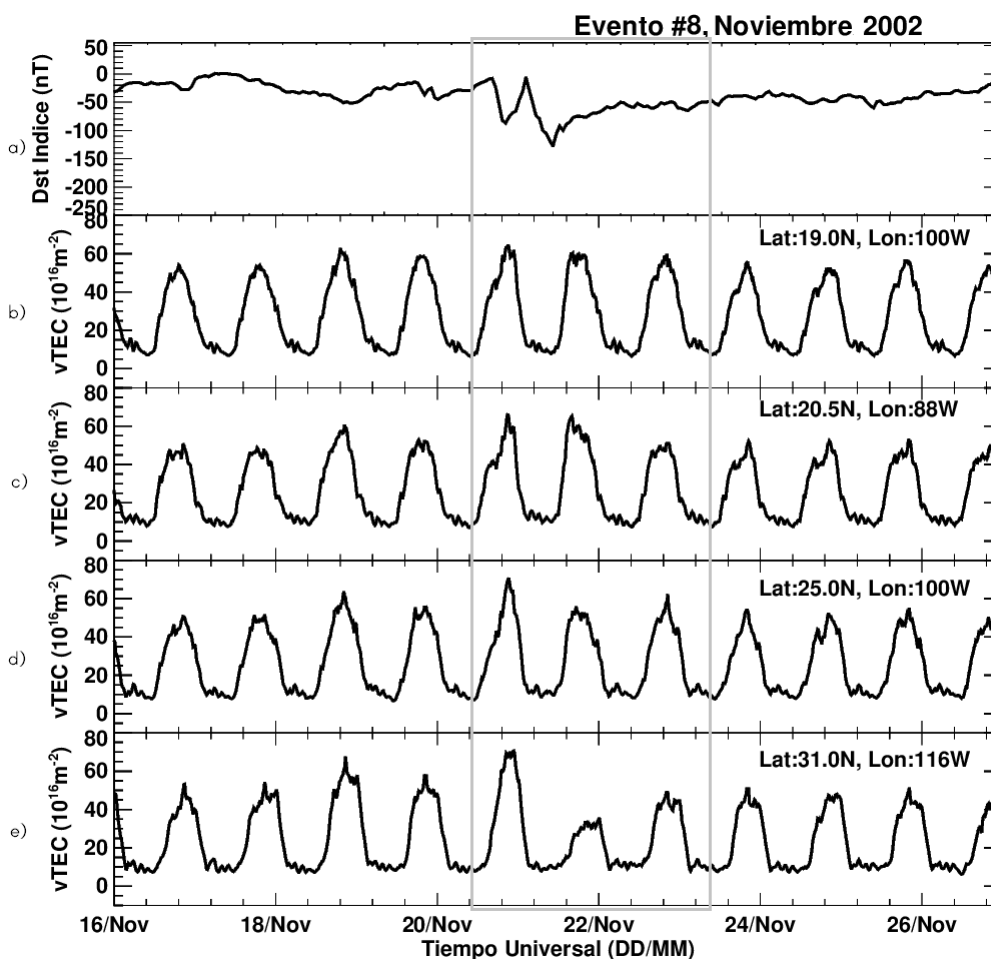


Figura 4.8: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #8 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Es fácil ver que los valores vTEC de estos once días para Morelia (ver apéndice 5.1, fig. 5.8a) están por debajo de mvTEC en todos los días hasta por 10vTEC de diferencia. De hecho, pareciera que ambos valores se ajustan mejor en los días de la tormenta geomagnética. Sin embargo, a diferencia del índice Dst, el índice W (ver apéndice 5.1, fig. 5.8b) no da indicios de una tormenta al menos intensa. Por último, el espectro de *wavelets* de la diferencia entre vTEC y mvTEC (ver apéndice 5.1, fig. 5.8c) tampoco presentan zonas de potencias importantes. Esto se refleja también en el espectro de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.8d), el cual solo contiene la frecuencia diurna igual a un día. Por otro lado, la varianza promedio (ver apéndice 5.1, fig. 5.8e) pasa por arriba del nivel de significancia en una sola ocasión, que corresponde al mínimo Dst el día 21 de noviembre.

4.2. Tormentas Geomagnéticas durante el año 2003

Este año 2003 es el más conocido a nivel de estudios ionosféricos, no por su gran colección de tormentas geomagnéticas (véase tabla 2.2), sino porque en él tuvo lugar uno de los eventos solares más destacados y estudiados, mejor conocido como *Halloween solar storm* (nombrado así por su cercanía con la festividad norteamericana) que ocurrió a finales de octubre del 2003 y es

considerado uno de los eventos solares más intensos de los últimos 20 años.

4.2.1. Evento No.9: 29 de mayo de 2003

Aproximadamente cinco EMC tipo Halo ocurrieron en las fechas cercanas al valor mínimo Dst de esta tormenta (ver tabla 4.10). Además de dos ráfagas solares tipo X (ver tabla 4.11). Esto tuvo como consecuencias que la tormenta clasificara como tipo compleja, es decir, diferentes factores solares intervinieron en ella.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
27/05/03	06:50:05	Halo (BA)	509	-14.6*1	—
27/05/03	23:50:05	Halo (S)	964	-9.6*1	3.70+031*2
28/05/03	00:50:05	Halo (BA)	1366	25.9*1	1.20E+032*2
29/05/03	01:27:12	Halo (BA)	1237	-22.3	3.00E+031*2
31/05/03	02:30:19	Halo (OA)	1835	-2.4*1	2.40E+032*2

Tabla 4.10: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 29 de mayo de 2003.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
27/05/03	22:56	X 1.3	-17	7	365
29/05/03	00:51	X 1.2	-37	6	365

Tabla 4.11: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 29 de mayo de 2003.

Lo anterior produjo una firma bastante particular en la variación del TEC sobre la ionosfera de las cuatro diferentes latitudes consideradas (véase fig. 4.9). Este evento fue posible identificarlo debido a su bajo valor Dst de $-144nT$ (fig. 4.9a) correspondiente al día 29 de mayo a las 21:00 horas (TU). Además, su fase de recuperación fue bastante rápida, ya que fue alrededor de solo 18 horas después del mínimo Dst que los valores comenzaron a oscilar alrededor del cero y sin presentar segundos decaimientos.

Adicionalmente, el comportamiento ionosférico destaca principalmente a partir del día 28 de mayo, ya que sobre las cuatro distintas latitudes se puede observar una oscilación anómala de la variación diurna, esto nos indica la presencia ráfagas solares (ver tabla 4.11).

Alrededor del día 30 de mayo, el $vTEC$ se incrementa en gran medida (en relación a su alrededor) hasta valores de $80vTEC$ para Morelia, Mérida y Monterrey (ver 4.9). Mientras que para latitudes más altas como las de Ensenada llegó solamente a valores cercanos a $45vTEC$. Todos estos valores máximos de $vTEC$ coinciden (en la línea de tiempo) a la perfección con el valor mínimo de Dst.

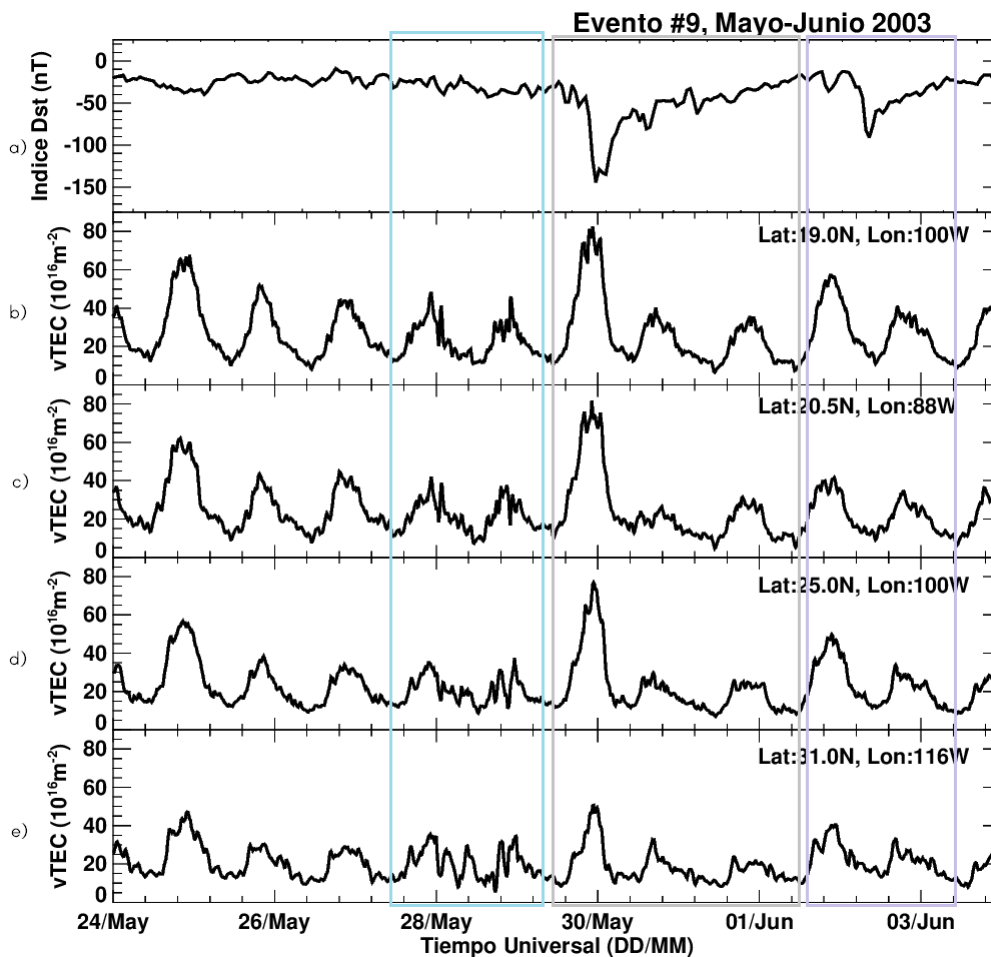


Figura 4.9: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #9 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

La primera gráfica (ver apéndice 5.1, fig. 5.9), correspondiente a Ensenada muestra un pico ionosférico asociado al mínimo Dst, cuya diferencia vTEC con respecto a mvTEC es de 30vTEC aproximadamente. Además en el panel 5.9b de la misma gráfica, el índice W llega a valores de hasta -0.757 que corresponden a una clasificación -4, es decir, intensa negativa + tormenta. A si mismo, dos días después, vuelve a intersectar la línea -4, pero ahora con valores de -0.305 .

En el método de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.9c) las potencias relacionadas a la perturbación del día 28 de mayo son fácilmente notables. La transformada de Fourier nos da dos frecuencias justo arriba del nivel de significancia del 95%. Una de ellas por arriba de la frecuencia diurna igual a uno cuyo valor es alrededor de 0.7días y la otra frecuencia tiene valor alrededor de 0.1. Mientras que los valores de la varianza promedio sobrepasan el nivel de significancia en dos ocasiones. La primera más que la segunda.

En el caso de la ciudad de Morelia, la variación vTEC es levemente menor en comparación con mvTEC de 27 días previos (ver apéndice 5.1, fig. 5.9a). Esto produce algunas diferencias negativas notables en el panel siguiente (ver apéndice 5.1, fig. 5.9b) y algunas positivas. Las más sobresalientes están ligadas a un índice W -4 y +4 respectivamente (ver apéndice 5.1, fig. 5.9b).

En el método de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.9c) las potencias son menos visibles que en el caso de Ensenada. Además, El espectro de Fourier solo contiene la frecuencia 0.7 dias (ver apéndice 5.1, fig. 5.9d). Por último, el nivel de significancia es rebasado justamente el día del mínimo valor Dst, con valores numéricos arriba de 150 vTEC^2 .

4.2.2. Evento No.10: 18 de junio de 2003

Esta tormenta ocurre justo a la mitad del año 2003. Donde se le relaciona varia actividad solar; tres EMC tipo Halo (tabla 4.12), las dos últimas con velocidades muy rápidas y una intensa ráfaga solar (ver tabla 4.13).

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
10/06/03	06:30:05	Halo (BA)	525	-2.7*1	1.30E+031*2
15/06/03	23:54:05	Halo (OA)	2053	-0.9	2.20E+032*2
17/06/03	23:18:14	Halo (OA)	1813	-2.9	2.70E+032*2

Tabla 4.12: EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas del 10 de junio de 2003.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
15/06/03	23:25	X 1.3	-80	-7	386

Tabla 4.13: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de las tormentas geomagnéticas del 10 de junio de 2003.

Lo anterior se refleja en la figura 4.10. La fase inicial de esta tormenta comenzó el 16 de junio a las 10:00 horas (TU), a partir de esta fecha, osciló alrededor de niveles de -50 nT , justo hasta el día 18 de noviembre con -51 nT a las 06:00 horas (TU) y en tan solo 4 horas más el Dst llegó a -141 nT . A pesar de esto logró recuperar mayores valores Dst y cercanos a cero bastante rápido (-12 nT el 20 de junio a las 10:00 horas (TU)). Su fase de recuperación fue lineal y constante, con una duración de 2 días.

Desde la fase inicial, el TEC redujo sus valores para las cuatro diferentes latitudes. En el caso de Ensenada paso de los 40 vTEC a los 21 vTEC y para Morelia de 50 vTEC a 33 vTEC .

A través del método de *wavelets*, el índice W para Ensenada, clasifica a la tormenta en dos ocasiones como -4 con valores -0.324 y -0.311 . Mientras que para Morelia el mínimo valor W fue de -0.275 . El espectro de Fourier solo en el caso de Ensenada contiene frecuencias que pudieran contener información importante sobre la perturbacion ionosférica y que rebasan muy finamente el nivel de significancia, con valores de 0.5 dias y 0.1 dias . En ambas latitudes no se logra rebasar el nivel de significancia de la varianza promedio (ver apéndice 5.1, fig. 5.10e).

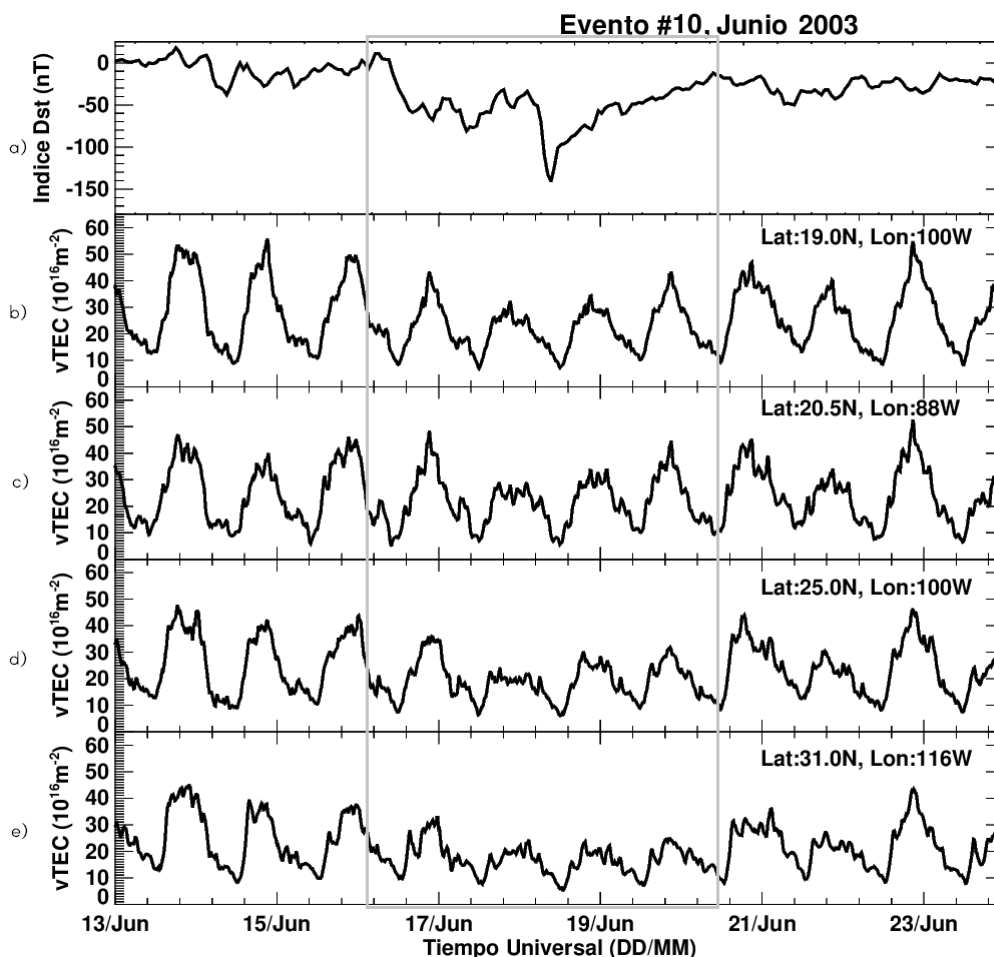


Figura 4.10: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #10 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

4.2.3. Evento No.11: 18 de agosto de 2003

Como resultado de filtrar la base de datos EMC se tiene la tabla 4.14 que muestra tan solo un EMC ocurrido alrededor de esta tormenta geomagnética. De la misma forma, una ráfaga solar (ver tabla 4.15).

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
14/08/03	20:06:05	Halo (OA)	378	4.4	—

Tabla 4.14: EMC asociada a la tormenta geomagnética del 18 de agosto de 2003.

Con una fase de comienzo el día 17 de agosto (véase fig. 4.11a) alrededor de las 15:00 horas (TU), es decir, un día antes del mínimo Dst (18 de agosto -148 nT a las 16:00 horas (TU)) y una fase de recuperación de más de dos días. Esta TG logró afectar en una forma similar las cuatro latitudes; por un lado, al bajar los valores Dst el vTEC sobre cada latitud aumenta en comparación

Fecha	Hora (TU)	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
DD/MM/AA	HH:MM				
19/08/03	07:38	M 2.0	-63	12	386

Tabla 4.15: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 18 de agosto de 2003.

con la variación diurna, mientras que durante el mínimo Dst, los valores vTEC son muy bajos en todas las latitudes (gráfica 4.11).

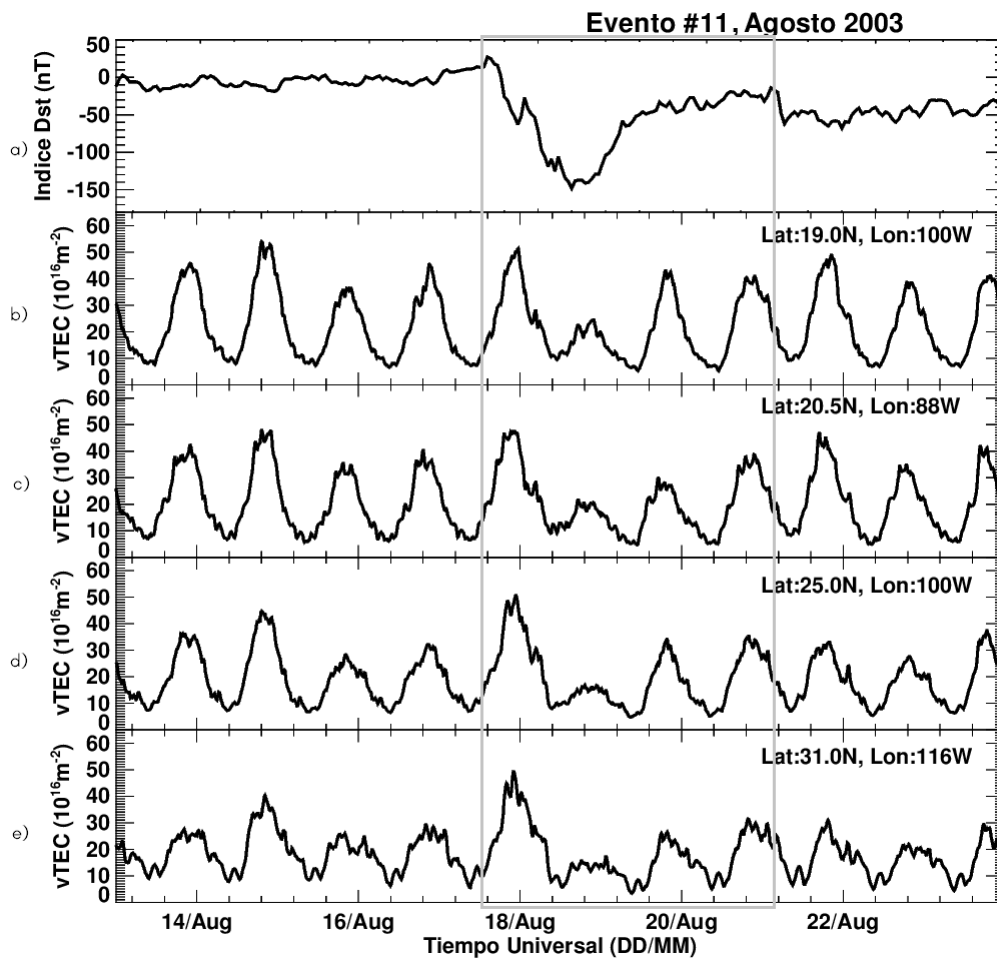


Figura 4.11: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #11 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Aún y cuando la mayoría de los valores vTEC para la latitud de Ensenada son muy bajos (alrededor de las 30 vTEC), logran sobresalir, por arriba de mvTEC dos picos, uno a finales del 14 de agosto y el otro el 18 de agosto. El segundo de mayor interés ya que es el que se relaciona con el mínimo valor Dst. Aunado a esto, un tercer caso aparece pero por debajo de mvTEC (sexto pico de izquierda a derecha). Tanto el 18 de agosto como el 19 presentan una clasificación W4. Más allá de esto, el análisis de esta tormenta, a través de la resta entre vTEC y mvTEC y aplicando el

método de *wavelets* nos produce la gráfica 5.11c del apéndice 5.1 donde las potencias más grandes se concentran debajo del periodo uno. Lo mismo para el espectro de Fourier. El único pico sobresaliente en la varianza promedio (ver apéndice 5.1, fig.5.11e) corresponde a finales del día 17 y principios del 18 de agosto.

En el caso de Morelia, la gráfica 5.11a del apéndice 5.1 muestra que el quinto y sexto pico, correspondientes a los días 18 y 19 de agosto respectivamente, presentan una diferencia apreciable respecto a mvTEC. Esto se corrobora en el gráfico 5.11b del apéndice 5.1 que es justo donde el índice W marca una clasificación W4. Sin embargo, tanto en el método de *wavelets* como en la transformada de Fourier, ambos aplicados a la resta entre vTEC y mvTEC, se logra obtener una frecuencia por arriba del nivel de significancia del 95%. La varianza promedio presenta dos prominencias (una más por arriba que la otra) que corresponden a los días afectados durante la tormenta geomagnética (ver apéndice 5.1, fig. 5.11e).

4.2.4. Evento No.12: 30 de octubre de 2003

Para esta tormenta, se encontraron cuatro EMC tipo Halo (tabla 4.16) y siete ráfagas solares intensas (tabla 4.17), todas ellas ocurrieron en la misma región. Una de estas ráfagas fue clasificación X 17.2, de hecho, es la más intensa de este trabajo.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
18/10/03	15:30:21	Halo (BA)	627	-0.5	1.40E+031*2
21/10/03	03:54:05	Halo (OA)	1484	-124.3	1.30E+032*2
28/10/03	11:30:05	Halo (S)	2459	-105.2*1	—
29/10/03	20:54:05	Halo (BA)	2029	-146.5	3.40E+032*2

Tabla 4.16: EMC asociadas a las tormentas geomagnéticas de octubre de 2003 conocida como tormenta de *Halloween*.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
24/10/03	05:04	M 4.2	-74	-24	486
26/10/03	05:57	X 1.2	-44	-15	486
26/10/03	17:21	X 1.2	38	2	486
27/10/03	07:51	M 2.7	45	0	486
27/10/03	09:21	M 5.0	-26	-16	486
27/10/03	12:27	M 6.7	-25	-17	486
28/10/03	09:51	X 17.2	-8	-16	486

Tabla 4.17: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron en octubre de 2003 conocida como tormenta de *halloween*.

Para el análisis de esta tormenta se descargaron los valores vTEC con dos diferentes resoluciones. La primera de ellas con una resolución de 15 minutos y la segunda a 2 minutos. A continuación los resultados del vTEC cada 15 minutos: Fue el día 29 de octubre a las 7:00 horas (TU) que comenzó esta tormenta. Esta se caracteriza por poseer tres valores mínimos o picos negativos (ver fig. 4.12), es decir, esta tormenta podría dividirse como 3 subtormentas. La primera, mucho

menor que las otras, registró un índice de -151 nT cuya clasificación cae dentro del tipo intensa, mientras que la segunda alcanzó un valor de -353 nT y la tercera -383 nT , estas dos últimas con clasificación fuerte. Al conjunto de estas se le conoce como tormenta de *Halloween*.

El gráfico 4.12 muestra también los correspondientes valores $v\text{TEC}$ de cada ciudad. En este caso los valores para la ciudad de Ensenada llegaron a 240 y 250 unidades TEC respectivamente. Para Morelia fueron de 210 y 200 aproximadamente. Mientras que para Monterrey debajo de los 200 vTEC ambos picos. Por otro lado, en Mérida el primer máximo fue de 198 vTEC y solamente 125 vTEC en el segundo. Este último con una diferencia de más de 100 unidades TEC en comparación con Ensenada.

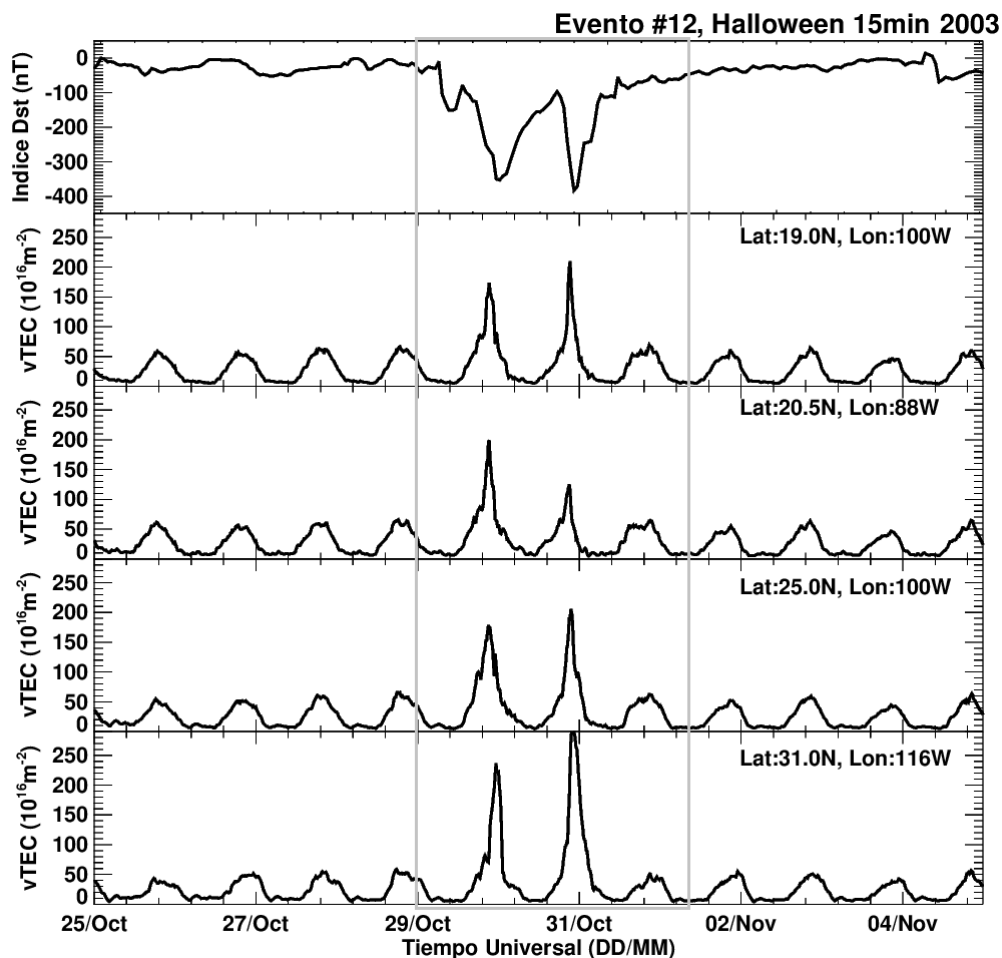


Figura 4.12: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o $v\text{TEC}$ con datos cada 15 minutos para el evento #12 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Esta tormenta está relacionada con varios eventos solares. Los más importantes son: una ráfaga detectada sobre la corona solar el día 28 de octubre a las 09:51 horas TU con intensidad X17.2 desde la región No. 486. Las otras son EMC tipo Halo; Las más veloces sucedieron el día 28 de octubre a las 11:30 (TU) con velocidad lineal de 2459 km/s mientras que la segunda fue un día después, a las 20:54 (TU) con velocidad lineal de 2029 km/s . A una velocidad aproximada como esta, les toma alrededor de 20 horas en impactar la magnetósfera terrestre.

El gráfico 4.12a muestra también el valor máximo de $vTEC$ en las cuatro ciudades. Al aplicar el método de *wavelets* se obtienen las gráficas 5.12 del apéndice 5.1. La primera (ver apéndice 5.1, fig. 5.12), que corresponde a Ensenada, tiene una diferencia notable entre los valores $vTEC$ perturbados y los días quietos ($mvTEC$). Lo anterior además alcanza los valores positivos más altos (de las 18 tormentas) en el índice W . Además, las potencias asociadas con el espectro de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.12c) se concentran en los dos días de la tormenta. Adicionalmente existen tres frecuencias del espectro de Fourier (ver apéndice 5.1, fig. 5.12d) que oscilan entre los 0.2, 4.0 y 1 *días* aproximadamente. Por otro lado, la valores TEC sobre Morelia producen una diferencia también notable correspondiente al panel b) de la gráfica 5.12 que solo rebasa la línea positiva +4 en el índice W en dos ocasiones (ver apéndice 5.1, fig. 5.12c). De la misma forma, las potencias mayores del espectro de *wavelets* se concentran en los dos días del mínimo Dst (ver apéndice 5.1, fig. 5.12c). Mientras que las frecuencias de Fourier son parecidas a las de Ensenada, con valores de 0.25, 0.4 y 1 *días*.

Por último y a manera de comparación, se descargaron los mismos valores $vTEC$, para las mismas fechas pero ahora con una resolución de 2 minutos. Es decir, un total de 30 archivos por hora, 720 por día y más de 27000 archivos txt. Esto pretende dar un mejor acercamiento a las perturbaciones y obtener mejores resultados en las frecuencias asociadas. A continuación se muestra un análisis más detallado de estos datos.

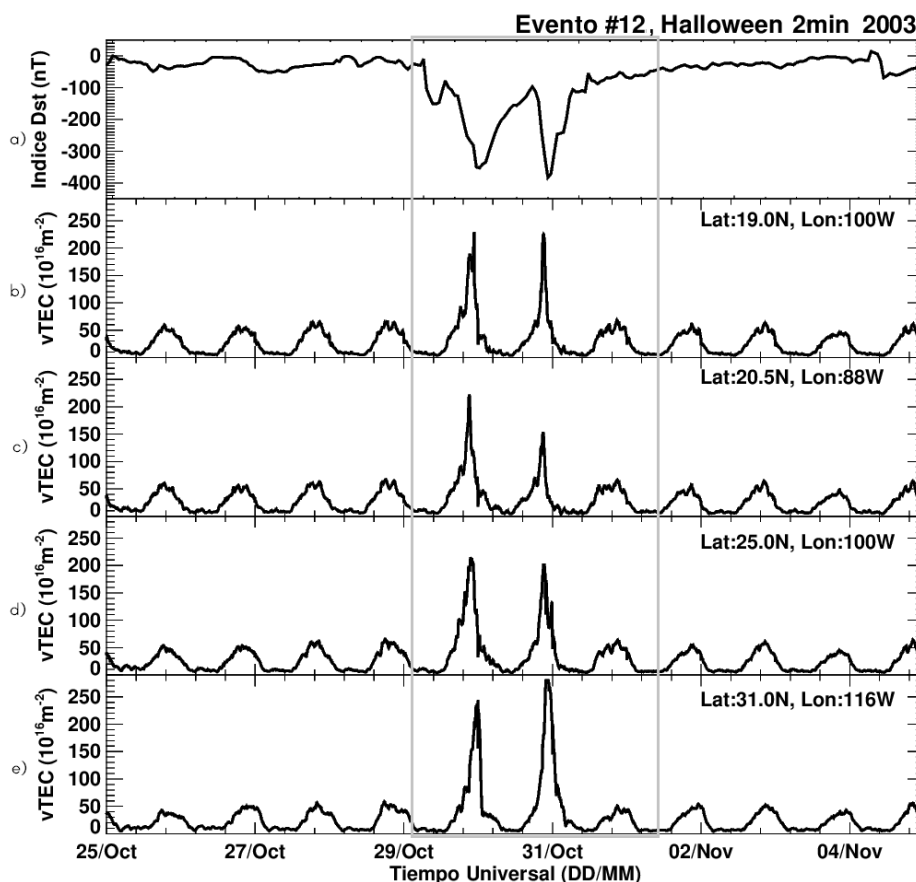


Figura 4.13: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), (*c*), (*d*) y (*e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o $vTEC$ con datos cada 2 minutos para el evento #12 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

La gráfica 4.13 contiene una mejor resolución de la variabilidad ionosférica de las cuatro diferentes ciudades. Esto nos permite, entre otras cosas, hacer una mejor medición del $vTEC$ sobre cada latitud. Por ejemplo, para Ensenada el TEC fue de 250 y 280 unidades TEC . Mientras que para Morelia fue de 230 $vTEC$ para ambos picos. Aunado a esto la diferencia $vTEC$ y $mvTEC$ es más fina, lo que también se refleja en el cálculo del índice W que ahora es de 0.924 para Ensenada y de 0.748 para Morelia (ver apéndice 5.1, fig. 5.13b). En el caso del espectro de Fourier, la diferencia no es mucha para latitudes como la de Ensenada. Sin embargo, para el caso de Morelia, las frecuencias logran sobresalir mucho mejor con datos a resolución de 2 minutos (ver apéndice 5.1, fig. 5.13d). Algo similar ocurre para la varianza promedio, ya que para Ensenada no presenta cambios muy grandes, aunque para Morelia la varianza promedio asociada a perturbación del primer día se incrementa con esta resolución (ver apéndice 5.1, fig. 5.13e).

4.2.5. Evento No.13: 20 de noviembre de 2003

Tan solo dos eyecciones resultaron después del filtro en la base de datos de CME catalog SOHO. Las cuales se encuentran en la tabla 4.18.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s^2]	E_k [erg]
18/11/03	08:50:05	Halo (BA)	1660	-3.3	3.30E+032*2
20/11/03	08:06:05	Halo (BA)	669	-23.8*1	8.40E+030*2

Tabla 4.18: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 20 de noviembre de 2003.

Esta tormenta tiene una firma bastante sencilla y peculiar. Con poco más de dos días de duración, comenzó el día 20 a las 3:00 horas (TU) cuyo índice Dst bajó hasta los $-422 nT$ en tanto solo 18 horas a partir de la fase inicial. A la par, su fase de recuperación es muy rápida (fig. 4.14a).

Los valores del TEC sobre las tres primeras latitudes se incrementa en comparación con los días anteriores, siendo de 100 $vTEC$ para Morelia (fig. 4.14b), pero decrementa en el caso de Ensenada con valores de 22 $vTEC$ (fig. 4.14e).

Haciendo el análisis de *wavelets* para la latitud de Ensenada (ver apéndice 5.1, fig. 5.14), se observa que el índice W choca en varias ocasiones el nivel -4 para los 5 días previos a la tormenta y en especial el día de la misma (ver apéndice 5.1, fig. 5.14b). Lo anterior se repite para el día de la tormenta pero en el caso de Morelia. A su vez el espectro de Fourier rebasa el nivel de significancia en frecuencias como 0.5, 0.7 y 1 *dias*, esto en la ciudad de Morelia y solo la frecuencia 1 *dia* para Ensenada. Por último, para la varianza promedio sobre Morelia existe un pico por arriba del nivel de significancia, esto coincide perfectamente con la gran diferencia entre el $vTEC$ y $mvTEC$ justo el día del mínimo valor Dst (ver apéndice 5.1, fig. 5.14e).

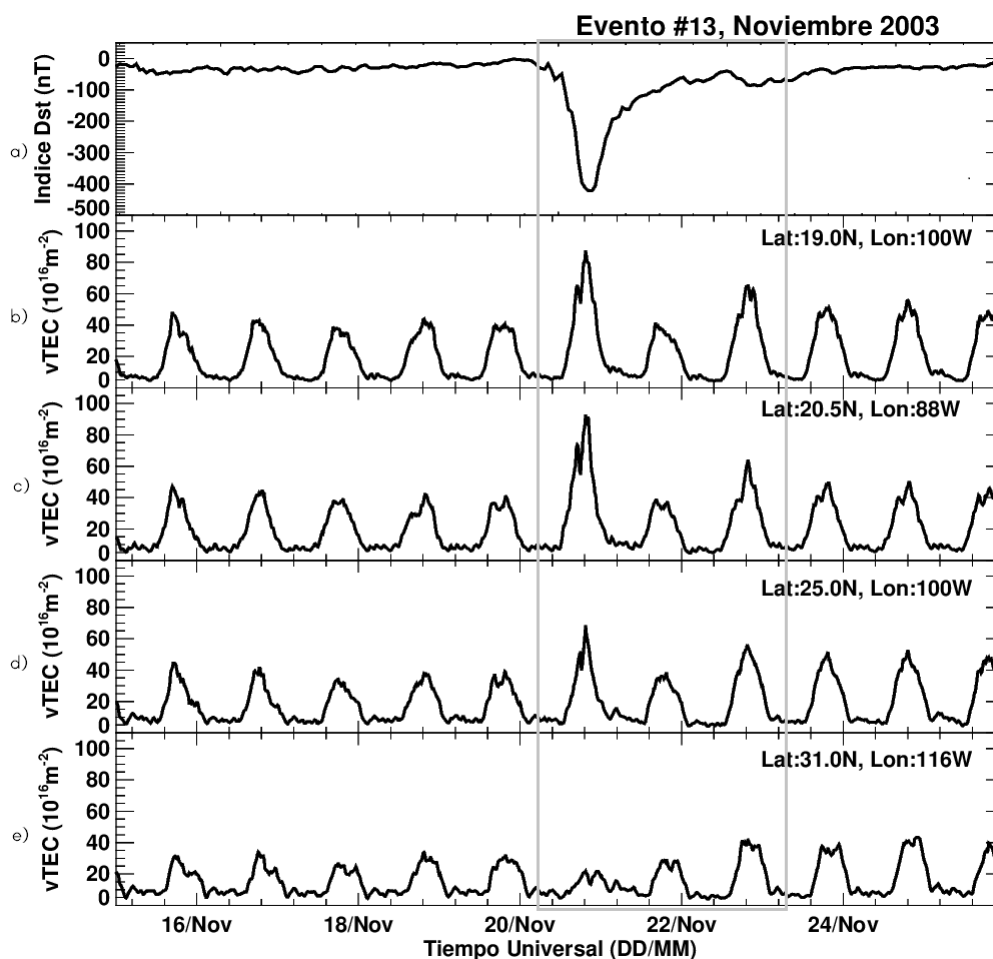


Figura 4.14: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #13 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

4.3. Tormentas Geomagnéticas durante el año 2004

Las primeras cuatro tormentas geomagnéticas de este año tuvieron una clasificación en el índice Dst de tipo intensa y la última de estos tres años llegó a una clasificación fuerte (véase tabla 2.2). Un número menor por año en comparación con el primer año 2002. Lo anterior en gran medida porque este año se encuentra en la fase de decaimiento del ciclo solar 23.

4.3.1. Evento No.14: 22 de enero de 2004

A este primer evento del 2004 se le relacionan tres EMC tipo Halo que muestra la tabla 4.19.

La fase inicial de esta tormenta comienza el día 22 a las 3:00 horas (TU) con valores positivos de hasta $26nT$, esta tormenta sufre un decaimiento no mayor a los $-130nT$ (mínimo valor Dst) y una fase de recuperación menos rápida e inestable ya que oscila en varias ocasiones. Además este índice logra recuperar valores alrededor del cero hasta el día 27 de enero (fig. 4.15).

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s ²]	E_k [erg]
20/01/04	00:06:05	Halo (BA)	965	17.2	4.70E+031*2
21/01/04	04:54:05	Halo (BA)	762	-13.7	1.60E+031*2
26/01/04	15:30:05	Halo (OA)	879	-0.1	1.10E+031*2

Tabla 4.19: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 22 de enero de 2004.

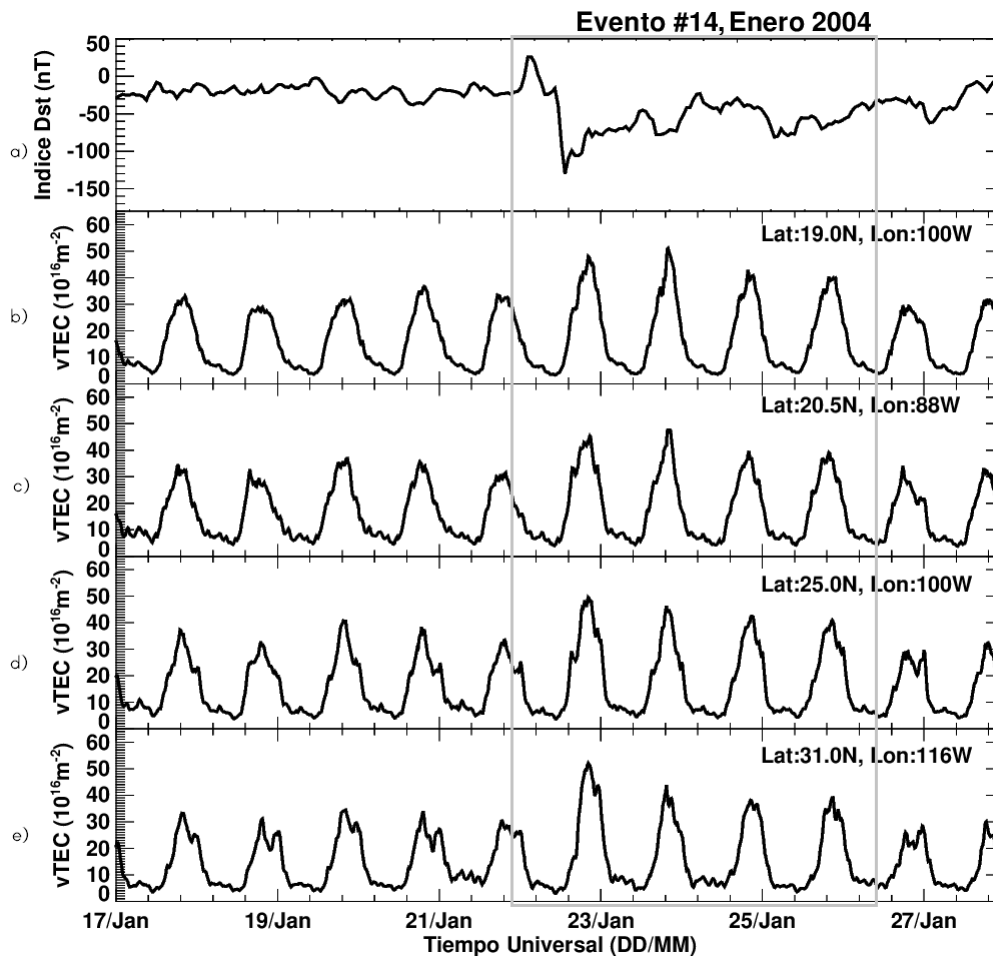


Figura 4.15: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #14 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Respecto al TEC sobre cada una de las cuatro estaciones, es ligeramente mayor en todas las latitudes en comparación con los días previos al mínimo Dst, al menos los cuatro días posteriores a este.

A través del método de *wavelets* se obtienen valores de 0.384 y 0.256 en el índice W para Ensenada y Morelia respectivamente (ver apéndice 5.1, fig. 5.15b). Las frecuencias por arriba del nivel de significancia son 0.2, 0.3 y 0.5 *días* para Ensenada y 0.5 y 1 *días* para Morelia. En el caso de la varianza promedio, los valores y las fechas en que rebasan el nivel de significancia son muy

parecidas para ambas latitudes y corresponden a los días posteriores al mínimo Dst (ver apéndice 5.1, fig. 5.15e).

4.3.2. Evento No.15: 4 de abril de 2004

La tabla 4.20 contiene la única ráfaga solar que ocurrió alrededor del día de la tormenta geomagnética.

Fecha	Hora (TU)	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
DD/MM/AA	HH:MM				
06/04/04	12:30	M 2.4	-15	-18	588

Tabla 4.20: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 4 de abril de 2004.

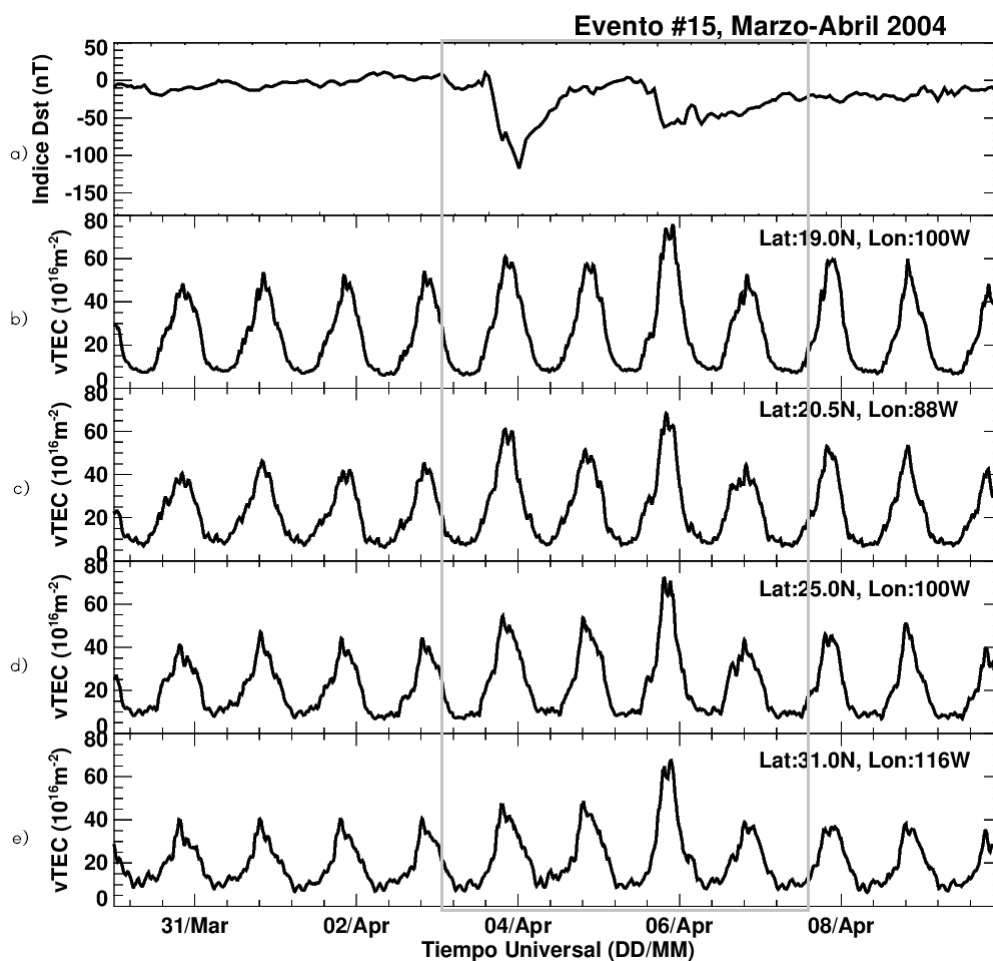


Figura 4.16: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #15 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

La gráfica 4.16 muestra un comportamiento Dst tranquilo en la mayoría del mes. Sin embargo,

el día 3 de abril a las 14:00 horas (TU) el índice comienza a descender durante 10 horas hasta alcanzar el valor mínimo de $-117 nT$. Es ahí cuando la fase de recuperación inicia para dos días después volver a bajar en valores alrededor de $-62 nT$.

Esto último tiene afectaciones en la variación diurna ionosférica a diferentes latitudes del territorio mexicano. Por ejemplo la gráfica (fig. 4.16b) que pertenece al TEC de la latitud de Morelia alcanzó valores más altos en la segunda caída del Dst y no cuando alcanzó los valores mínimos. Lo mismo para el caso de Ensenada.

A través del método de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.16a) podemos observar que mvTEC se ajusta muy bien al TEC perturbado en la mayoría de los once días graficados. Sin embargo, el índice W alcanza valores de 0.295 y 0.314 para la ciudad de Ensenada y Morelia respectivamente. Aunque solo la frecuencia de 0.2 *días* para Ensenada logró rebasar el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.16d). Por último, la varianza promedio pasa por arriba del nivel de significancia justo el día que existe una mayor diferencia entre vTEC y mvTEC para ambas latitudes (ver apéndice 5.1, fig. 5.16e).

4.3.3. Evento No.16: 27 de julio de 2004

A esta tormenta se le logró asociar mayor actividad solar que a las demás del mismo año; al menos cinco EMC (ver tabla 4.21) y tres ráfagas solares (tabla 4.22). Por lo que este evento se le considera tormenta compleja.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [<i>km/s</i>]	Aceleración [<i>m/s</i> ²]	E_k [<i>erg</i>]
13/07/04	09:30:05	Halo (BA)	747	-11.0*1	5.20E+030*2
20/07/04	13:31:52	Halo (BA)	710	16.6	—
23/07/04	16:06:06	Halo (BA)	824	-43.9*1	4.20E+030*2
25/07/04	14:54:05	Halo (BA)	1333	7	9.50E+031*2
29/07/04	12:06:05	Halo (OA)	1180	38	2.80E+031*2

Tabla 4.21: EMC asociadas a la tormenta geomagnética del 27 de julio de 2004.

Fecha DD/MM/AA	Hora (TU) HH:MM	Clase	Long Solar	Lat Solar	Region
23/07/04	17:07	M 2.2	8	4	652
25/07/04	06:30	M 1.0	26	5	652
25/07/04	14:19	M 1.1	33	8	652

Tabla 4.22: Lista de ráfagas solares tipo M y X que ocurrieron alrededor de la tormenta geomagnética del 27 de julio de 2004.

Aún y cuando se produjeron dos tormentas intensas (la primera no alcanzó la clasificación intensa) durante el mes de julio de 2004, el estudio de ellas se redujo a una sola tormenta, por la cercanía de todas ellas.

La variabilidad del índice Dst durante este mes de julio comienza a variar (ver fig. 4.17) a partir de la noche del día 22, ya que el Dst logra decaer y recuperar hasta tres veces en tan solo 5 días.

El primer mínimo no logra clasificar como tormenta intensa ($Dst = -99nT$). Sin embargo, el segundo pico negativo tardó más de un día en alcanzar valores de $-136nT$ el día 25 a las 17:00 horas. Mientras que el tercer y último pico comenzó el día 26 a las 23:00 horas y después de casi quince horas logró bajar hasta los $-170nT$ recuperándose lentamente hasta los tres días después.

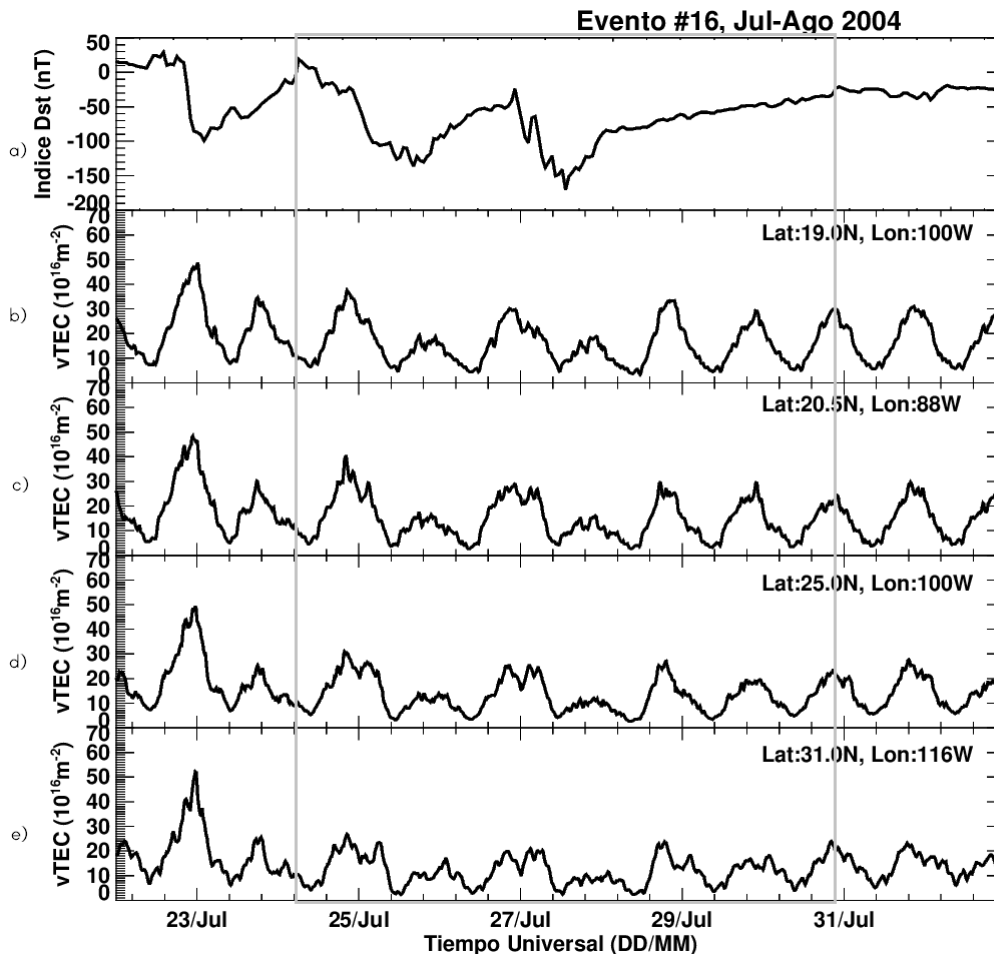


Figura 4.17: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #16 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

El TEC durante la fase inicial y de recuperación fue muy variable desde el 23 de julio en las cuatro latitudes graficadas. Sin embargo, mantienen una estructura similar todas ellas (fig. 4.17) durante el paso de las dos tormentas geomagnéticas.

A través del método de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.17) la variabilidad ionosférica diurna de la ciudad de Ensenada parece gravemente alterada no solo en el panel a) sino también en el b) con el índice W, cuyo valor más bajo fue de -0.602 . Las frecuencias levemente rebasadas en el espectro de Fourier son de 0.15, 0.2, 0.4 y 0.7 *días* y la varianza promedio el día 23 de julio rebasó por mucho el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.17e).

En el caso de Morelia, el índice W (ver apéndice 5.1, fig. 5.17b) también marca valores bajos de -0.410 que corresponden al mínimo Dst de la tormenta. Aunque ese es el aspecto más destacable para esta latitud ya que ni el espectro de Fourier tiene frecuencias por arriba del nivel de signifi-

cancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.17d) ni la varianza promedio asociada a la diferencia entre $vTEC$ y $mvTEC$ (ver apéndice 5.1, fig. 5.17e).

4.3.4. Evento No.17:30 de agosto de 2004

No se encontraron eyecciones o ráfagas solares alrededor del día de esta tormenta.

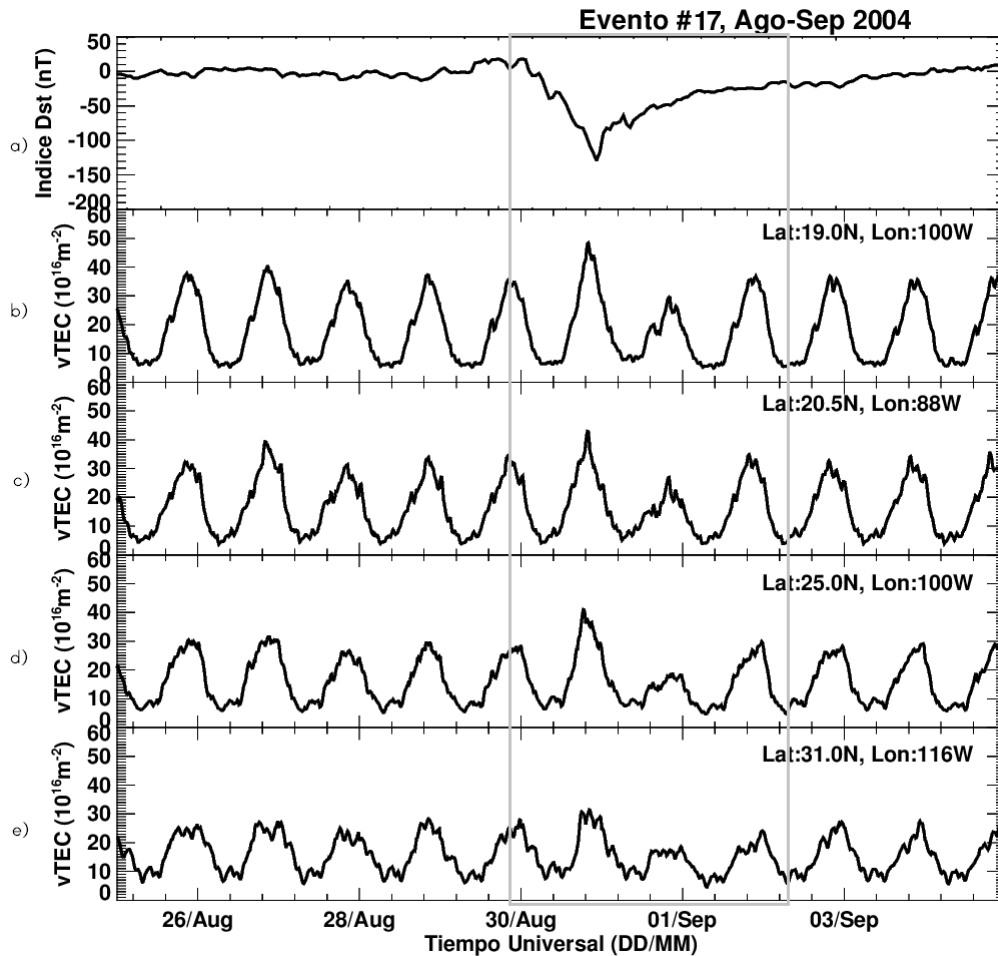


Figura 4.18: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o $vTEC$ para el evento #17 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

Justo cuando parecía que en el mes de agosto de 2004 el índice Dst no tomaría valores menores a $-50nT$ (fue un mes muy tranquilo debido quizá al periodo de decaimiento del ciclo solar) al final del mes de agosto, el índice Dst logró registrar lo una tormenta geomagnética (ver fig. 4.18a). Esta tormenta comienza el día 30 de agosto a las 01:00 horas, horas después comienza a bajar gradualmente hasta llegar a $-129nT$ el mismo día por la noche. Algo similar sucede con su fase de recuperación ya que fue gradual y lentamente logra recuperar valores cercanos a cero en menos de 2 días. En el caso de la ionosfera para las cuatro latitudes gráficas, la variación TEC diurna es más ionizada a medida que la latitud baja. Por ejemplo, para Ensenada el $vTEC$ lo rebasa los $30vTEC$ mientras que para coordenadas como las de Morelia, el $vTEC$ se encuentra oscilando

alrededor de los $40vTEC$.

Tomando de nuevo el caso de Ensenada, con ayuda de $mvTEC$ a 27 días previos, ajustamos la serie de tiempo $vTEC$ perturbada y se obtiene la gráfica (ver apéndice 5.1, fig. 5.18a). Al restar estos dos datos se obtiene el panel (ver apéndice 5.1, fig. 5.18b) el cual parece no oscilar considerablemente. Además el índice W de color azul clasifica como -4 justo en la fase de recuperación de la tormenta (ver apéndice 5.1, fig. 5.18b).

En el caso de las *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.18c) no destaca ningún periodo en particular, lo mismo para el espectro de Fourier del siguiente panel (ver apéndice 5.1, fig. 5.18d). Un pico logra rebasar el nivel de significancia en la varianza promedio de tan solo $14vTEC^2$ (ver apéndice 5.1, fig. 5.18e).

Para coordenadas como las de Morelia, el $vTEC$ perturbado y $mvTEC$ de la rotación solar previa, logran coincidir al momento de su graficación en una línea de tiempo (ver apéndice 5.1, fig. 5.18a). Esto también no lo dice el panel (ver apéndice 5.1, fig. 5.18b). A su vez, el índice W toma valores de -0.221 (ver apéndice 5.1, fig. 5.18b). El método de *wavelets* concentra un color rojizo durante el día del mínimo Dst y en su fase de recuperación (ver apéndice 5.1, fig. 5.18c). El último de los paneles de la misma gráfica, se concentra una mayor varianza promedio que la latitud anterior, esto por arriba de los $20vTEC^2$.

4.3.5. Evento No.18: 8 de noviembre de 2004

Por último, las eyecciones de tipo Halo que muestra la tabla 4.23 ocurrieron alrededor del día de la última tormenta ionosférica del año 2004 (en realidad ocurrieron dos tormentas muy cercanas una de la otra pero se estudiaran como una sola). Particularmente la eyecta del día 10 de noviembre fue la más rápida de todo el año. Llegó a la altura de la Tierra 12 horas después aproximadamente.

Fecha (DD/MM/AA)	Hora (TU) (HH:MM:SS)	Central (PA)	Velocidad Lineal [km/s]	Aceleración [m/s^2]	E_k [erg]
06/11/04	01:31:51	Halo	818	-81.5	—
07/11/04	16:54:05	Halo (BA)	1759	-19.7	2.20E+032*2
08/11/04	03:54:05	Halo (S)	462	7.8	6.00E+030*2
09/11/04	17:26:06	Halo (OA)	2000	-65.1	1.80E+032*2
10/11/04	02:26:05	Halo (OA)	3387	-108.0*1	5.50E+032*2

Tabla 4.23: EMC asociadas a las tormenta geomagnética del 8 de noviembre de 2004.

Un comportamiento anómalo se observa durante este mes en la figura 4.19. En el transcurso del día 7 de noviembre esta gráfica dibuja dos picos positivos que pueden ser tomados como señal del avistamiento de una tormenta. Estos picos registraron un valor de 55 y $61 nT$ a las 13:00 y 20:00 horas (TU) respectivamente. Existen además dos valores negativos pronunciados. El primero de ellos alcanza valores de $-368 nT$ el día 8 de Noviembre a las 6:00 horas, mientras que el segundo pico ocurre el día 10 a las 11:00 horas con un valor mínimo de $-263 nT$. Entre ambos existe una diferencia de dos días aproximadamente. Sin embargo, es de notarse que el primer pico negativo recupera valores positivos más rápidamente que el segundo.

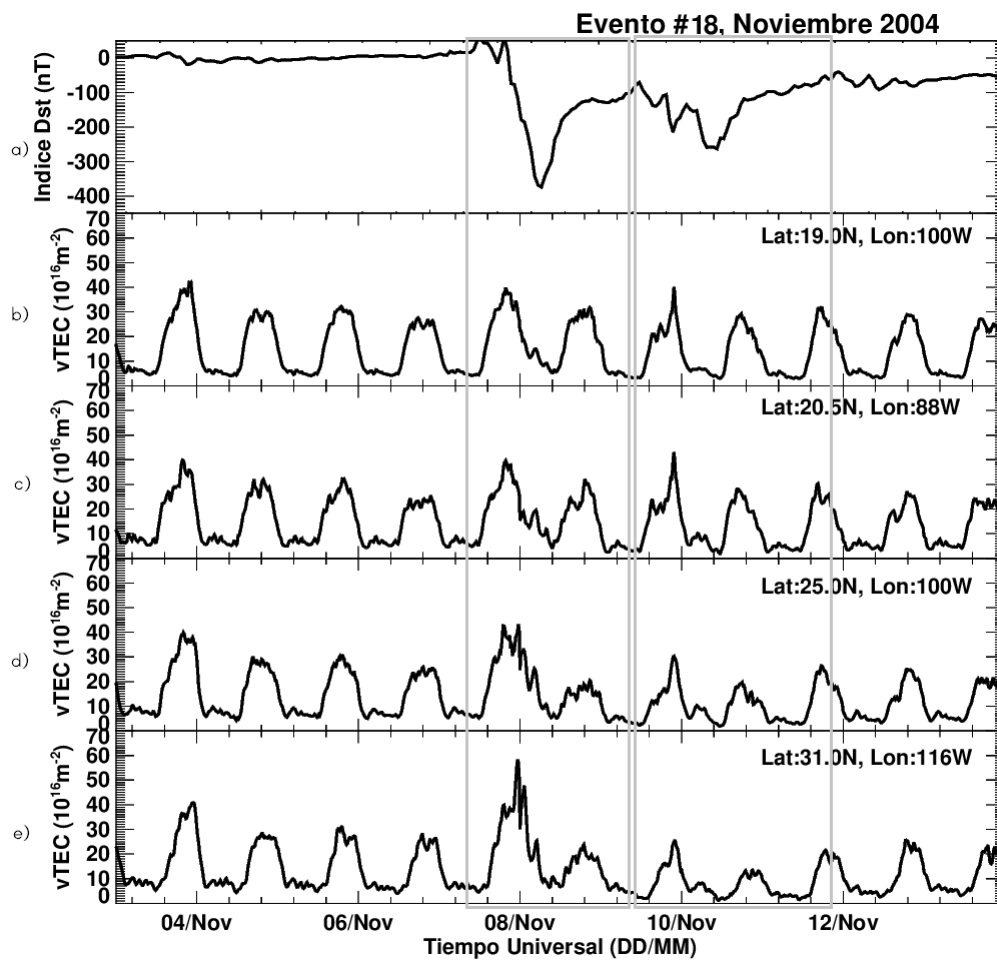


Figura 4.19: El panel *a*) indica el comportamiento del índice Dst en función del tiempo. Los cuatro paneles restantes (*b*), *c*), *d*) y *e*)) muestran el comportamiento del TEC vertical o vTEC para el evento #18 a diferentes latitudes y longitudes (ver mapa 3.4) sobre territorio mexicano.

En cuanto al comportamiento de la ionosfera, los últimos tres paneles de la gráfica 4.19 muestran claramente un comportamiento anómalo para la variación diurna. Lo anterior no solo para la tormenta del día 8 de noviembre sino también para la del día 10 de noviembre. La cuantización de estas perturbaciones será más fácilmente medible a través del método de *wavelets* aplicado a diferentes latitudes.

A partir de la gráfica 5.19a del apéndice 5.1 podemos observar un alto nivel TEC en comparación con mvTEC de 27 días previos alrededor del día 8 de noviembre. A partir de entonces el contenido electrónico se reduce en casi 15 unidades TEC para los 5 días posteriores al mínimo Dst (5.19b). Esto se ve reflejado en el cálculo del índice W que clasifica por arriba del nivel W4+ y en innumerables ocasiones el nivel W4 negativo (ver apéndice 5.1, fig. 5.19b). En el caso del método de *wavelets* (ver apéndice 5.1, fig. 5.19c) destaca la diferencia TEC del día perturbado y uno tranquilo. Para la transformada de Fourier, la frecuencia 0.2 dias rebasa finamente el nivel de significancia (ver apéndice 5.1, fig. 5.19d). Al término de esta gráfica se observa la única varianza promedio más prominente que llega hasta 130 vTEC^2 (ver apéndice 5.1, fig. 5.19e).

En contraste con la anterior latitud, la variación diurna vTEC sobre Morelia aún cuando no pareciera tan perturbada en comparación con mvTEC (ver apéndice 5.1, fig. 5.19a) el índice io-

nosférico logra clasificar como W4 positivo justo el día de la tormenta. Además, alcanza el nivel W4 negativo dos días después (apéndice 5.1, fig. 5.19b). A diferencia de Ensenada, el método de *wavelets* dibuja una concentración rojiza los días posteriores al 8 de noviembre (ver apéndice 5.1, fig. 5.19c) que generan una frecuencia de 0.5 días por arriba del nivel de significancia. Igual que la varianza promedio en el último de los cuatro paneles (ver apéndice 5.1, fig. 5.19e).

4.4. Comparación de eventos

Para organizar toda la información anterior, la tabla 4.24 resume varias de las características más importantes de cada uno de los 18 eventos en orden cronológico. De esta forma es posible comparar los valores vTEC y mvTEC para Ensenada y Morelia como parte del ejercicio de este trabajo, aunque se pueden comparar cualquiera de los valores de vTEC a diferentes latitudes (según sea la malla del USTEC).

No. Evento	Ensenada			Morelia			Índice Dst nT
	vTEC	mvTEC	W	vTEC	mvTEC	W	
# 1	40	84	-0.541	91	101	0.216	-149
# 2	80	70	-0.253	59	98	-0.308	-110
# 3	44	69	-0.322	73	90	-0.214	-109
# 4	65	45	0.245	84	61	0.220	-106
# 5	64	46	-0.261	79	65	-0.262	-109
# 6	65	52	-0.272	105	67	-0.180	-181
# 7	34	64	-0.500	52	75	-0.423	-174
# 8	34	63	-0.313	51	66	-0.281	-128
# 9	52	33	-0.757	82	49	-0.363	-144
# 10	21	34	-0.324	33	49	-0.275	-141
# 11	50	25	-0.443	51	31	-0.315	-148
# 12 (15min)	281	40	0.882	209	50	0.659	-353
# 12 (2min)	293	40	0.924	228	48	0.748	-353
# 13	22	35	-0.419	100	44	0.380	-422
# 14	53	34	0.384	49	31	0.256	-130
# 15	48	45	0.295	61	52	0.314	-117
# 16	12	21	-0.602	19	30	-0.410	-170
# 17	32	26	-0.361	49	38	-0.221	-129
# 18	58	29	-0.759	41	34	-0.332	-374

Tabla 4.24: Tabla comparativa en unidades TEC entre los valores vTEC máximos/mínimos perturbados y su correspondiente mediana vTEC (mvTEC) para las ciudades Ensenada y Morelia durante el paso de la tormenta geomagnética.

El panel b) de la gráfica 4.20 comprueba la hipótesis de que a latitudes más altas (Ensenada p.e.) mayor es la perturbación ionosférica. Lo anterior no significa que a latitudes bajas (Morelia p.e.) no ocurran perturbaciones ionosféricas (véanse los eventos #7, #12 y #16). Este índice nos da una forma más personalizada si queremos conocer el efecto sobre alguna coordenada específica (a diferencia del índice Dst).

Es interesante notar además que la mediana del vTEC (mvTEC) tiende a disminuir tanto para latitudes cercanas a la ciudad de Ensenada como las de la ciudad de Morelia (panel d) figura 4.20) a lo largo de los tres años estudiados. De hecho para Ensenada el valor mvTEC fue en su mayoría

menor en comparación con Morelia (ver panel d)). La posible explicación es que este efecto podría estar relacionado con la variación estacional del vTEC para cada año (véase sección 2.2.1).

Es importante notar también que en la mayoría de los casos (aunque no necesariamente siempre ocurre) entre más grande sea la caída del índice Dst, mayor será la respuesta del vTEC y en consecuencia del índice W (panel a), b) y c) de la gráfica 4.20). Un claro contraejemplo es el evento #18 en el que se observa una gran caída del Dst, sin embargo no hubo gran respuesta del vTEC, aunque, localmente a la latitud de la Ciudad de Ensenada, el índice W si fue afectado sustancialmente (ver panel b) del evento #18).

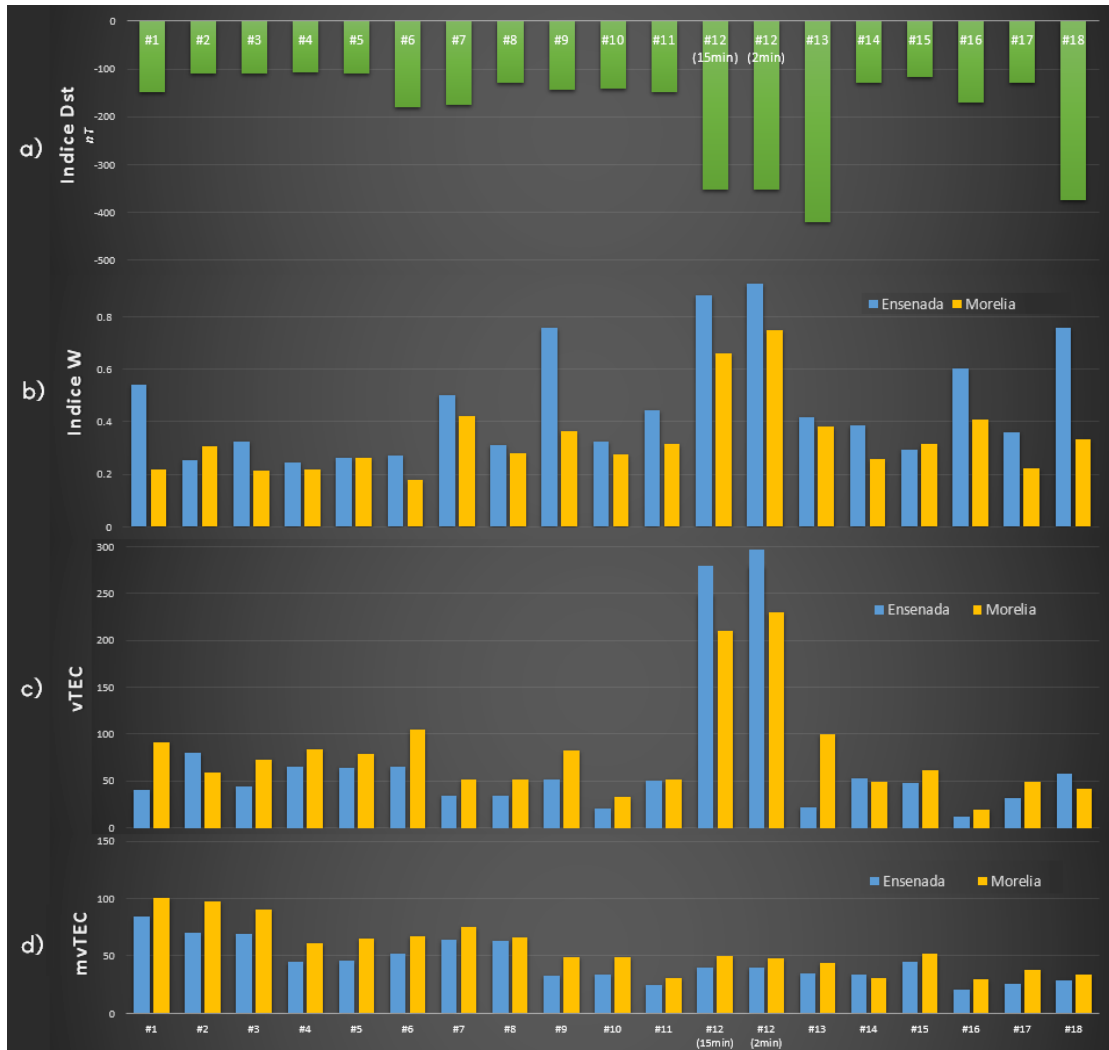


Figura 4.20: Histograma en relación a la tabla 4.24 del valor Dst (mínimo) panel a), índice W (en valor absoluto) panel b), vTEC y mvTEC para las ciudades de Ensenada y Morelia respectivamente en el panel c) y d).

Capítulo 5

Conclusiones

Dado que la Tierra se encuentra inmersa en el continuo flujo del viento solar, que no es más que la atmósfera solar en continua expansión, la actividad del Sol juega un papel preponderante en la dinámica del plasma ionosférico de nuestro planeta. En este contexto, es importante estudiar particularmente el ciclo de 11 años del Sol. El estudio de las perturbaciones ionosféricas (PI) es fundamental para entender su origen y cuantificar sus efectos físicos observables a través de su correlación con dicha actividad solar. En este trabajo se estudió y cuantificó el efecto de las PIs a través de un índice, W4, que midió la alteración o variación del contenido de electrones a lo largo de la vertical (vTEC por sus siglas en inglés) de 18 casos de eventos simples y complejos producidos por el Sol. El periodo de estudio en este trabajo comprendió del año 2002 al 2004 correspondiente a la fase de descenso del ciclo solar 23. En donde los eventos seleccionados sugieren la presencia de tormentas geomagnéticas con clasificación fuerte e intensa ($Dst < -100$).

Con la incorporación del código USTEC en el Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales (LACI-GE) de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la UNAM, nuevas ventanas de oportunidad en el ámbito de la investigación se han abierto para México. Es una oportunidad única para resaltar aspectos sobre el comportamiento de la ionosfera que se encuentra por encima de nuestro territorio ante eventos solares intensos. De esta forma, se considera que la importancia y relevancia de estudiar y llevar a cabo un trabajo como este, durante esta primera etapa, radica en los siguientes puntos:

1. Analizar en detalle los efectos ionosféricos producidos por eventos solares importantes como ráfagas y EMC, tanto en el pasado como en tiempo real haciendo uso de estaciones de GPSs fijas en territorio mexicano. A mayor número de estaciones de este tipo sobre nuestro territorio, mejores y más precisos serán los cálculos del vTEC, ya que se tendrá una mejor resolución espacial en los mapas y de esta forma, estaremos en mejores posibilidad de estudiar estos efectos. Es importante destacar que este trabajo es pionero en esta etapa.
2. Realizar análisis exhaustivos con los datos existentes y aprender del comportamiento de la ionosfera durante una PI. Por lo pronto las herramientas aplicadas en este trabajo, como *wavelets* y Fourier, corroboran la existencia de una PI y además de que permiten caracterizar las frecuencias existentes en dichas perturbaciones. Esto plantea una línea de investigación que se está desarrollando en nuestro país pero sobre todo en Michoacán donde además se cuenta actualmente con el Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX).

Con base en toda la información obtenida a lo largo de este trabajo y aportando conclusiones

sobre el mismo, se puede mencionar que a través del índice Dst, que mide la perturbación de la magnetósfera se identificó el momento preciso en el que ocurrieron 18 TGs intensas (varias de ellas complejas en el sentido de que se produjeron a la par ráfagas solares en rayos X). Con los tiempos precisos de llegada de estos eventos y a través del código USTEC, fue posible obtener el vTEC para días alrededor (5 días antes y 5 días después) de los periodos en los que ocurrieron tales eventos. En términos generales se pueden resumir conclusiones de estos 18 eventos de la siguiente forma:

- El índice W clasificó como PI con (+/-) 4 a 14 de estas perturbaciones para el caso de Ensenada y 10 para Morelia.
- Los eventos con el índice $|W|$ más alto en el caso de Ensenada fueron: #12 (2min), #18 y #9 cuyo valor fue de 0.924, 0.759 y 0.757 respectivamente, mientras que para Morelia fueron los eventos: #12, #7 y #16 con valores de 0.748, 0.423 y 0.41 respectivamente.
- De los 18 eventos, 2 de ellos (#3 y #11) fueron relacionados con una sólo EMC.
- 8 resultaron ser eventos complejos (#1, #3, #4, #9, #10, #11, #12 y #16), en los que se presentaron tanto ráfagas solares (tipo M o X) como EMC tipo Halo.
- Adicionalmente se puede mencionar que se encontró un total de 40 EMC tipo Halo alrededor de las tormentas; 12 en el 2002, 15 en el 2003 y 13 para el 2004.
- Así mismo, se encontró un total de 21 ráfagas solares (13 tipo M y 8 tipo X).
- Además, 4 eventos (#5, #7, #8 y #17) no tuvieron relación con EMC o *flares*.
- En promedio, la velocidad promedio de las EMC tipo Halo de los tres años fue de 1261 km/s . La más veloz fue de 3387 km/s (evento #18) seguida de 2459 km/s (evento #12) y 2392 km/s (evento #1).
- Para los 18 eventos, el valor máximo de vTEC osciló desde 60 uTECs hasta más de 280 uTEC (más de cuatro veces su valor normal) en el evento más intenso de este periodo que fue el evento de *Halloween* (#12).
- Todos los eventos fueron estudiados a través de la comparación del vTEC con su mediana a 27 días (1 rotación solar). Esto se realizó con la finalidad de que el comportamiento del vTEC reflejará más estados tranquilos del mismo antes de la llegada del evento. Esto permitió mejorar la rutina de análisis que previamente se tenía en la que a través de una función de suavizado (*smooth* en inglés) se generaban análisis posteriores como el de *wavelets*.
- A través del análisis de *wavelets* (*wavelets* en inglés) se encontraron frecuencias asociadas con las perturbaciones ionosféricas a un 95% de significancia. Dichas frecuencias fueron de periodicidad: 1 día (correspondiente a la variación diurna), 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 y 0.7 aproximadamente. Con el evento de *Halloween* se muestra que es necesario tener mejores resoluciones temporales (entre 2 y 5 minutos) en los valores de vTEC si se quieren estudiar a detalle las variaciones ionosféricas a menores frecuencias. Aunado a esto, la aplicación del método de *wavelets* permitió también cuantificar el grado de perturbación sobre cualquier punto geográfico seleccionado de la malla de valores que da el USTEC (en este caso se eligió Ensenada y Morelia).
- Se estudió el comportamiento del vTEC también a partir del índice W4, el cual mide la perturbación de la ionosfera. Se observó que en general este índice era negativo o positivo dependiendo del comportamiento de la mediana del vTEC con respecto al vTEC.

En términos técnicos, también se puede concluir que el uso del USTEC permitió el aprendizaje sobre el uso de varias funciones (rutinas y subrutinas en MATLAB) que realiza dicho código. Dentro de todas éstas, están las más importantes como la que permite descargar datos de estaciones GPS sobre diferentes regiones, a diferentes resoluciones. También las aplicaciones de estos valores y como generar mapas TEC, formatos de video y los valores vTEC correspondientes. En todos los casos se hace uso de interfaces gráficas como *gmagic* y *gplot* dentro del programa mismo. En este caso el análisis se realizó sobretodo con archivos ASCII con el tipo de formato ITEC que permitió identificar la variabilidad ionosférica a latitudes cercanas a ciudades mexicanas como: Ensenada, Morelia, Monterrey y Mérida.

Como conclusión final, se puede mencionar que este trabajo ha dejado la posibilidad de implementar rutinas propias, es decir, sin depender de un software privado como lo es el código USTEC. Cabe mencionar que se cuenta en este momento con las herramientas para hacer el análisis masivo de datos y además con la experiencia en este tipo de resolución temporal necesario para un análisis más fino. Sin embargo hay todavía mucho trabajo que realizar para permitir que la investigación sea óptima. A continuación mostraremos parte del trabajo a futuro que todavía faltaría por desarrollar.

5.1. Trabajo a Futuro

Este trabajo de investigación ha sido un primer paso en el acercamiento de la generación de mapas de vTEC sobre territorio mexicano y en su estudio a profundidad. Si bien se tomó sólo una parte de la fase de descenso del ciclo solar 23, en ella se encontraron 18 eventos importantes que fueron analizados, entre los que destaca el evento de *Halloween* del 2003 por su relevancia histórica en este ciclo. En general, las perturbaciones ionosféricas se han estudiado poco sobre nuestro territorio, debido por un lado a la escasa colección de datos de estaciones que se generan en tiempo real y por el otro a que no se contaba con un programa para poder hacer este tipo de investigación, con la creación del SCiESMEX (Servicio de Clima Espacial Mexicano) a través del Laboratorio Nacional del Clima Espacial (LANCE) y la investigación a través del LACIGE (Laboratorio de Ciencias GeoEspaciales) será posible poco a poco indagar más en estos fenómenos. En este contexto, este trabajo puede ser mejorado a través de las siguientes propuestas de desarrollo a futuro:

- Este trabajo fue desarrollado con poco más de 20 estaciones fijas sobre territorio mexicano. Sin embargo, a través de convenios de colaboración entre el LANCE y el Servicio Sismológico Nacional (SSN), se busca la incorporación de todas las estaciones que operan en este servicio sobre nuestro territorio para ser utilizadas por el código USTEC. Conjuntamente con los datos de UNAVCO, CORS, y TlalocNet se estima que México cuente con alrededor de 100 estaciones con las que se lograrán mejores precisiones en los mapas vTEC sobre México.
- Al contar con una mejor resolución de datos, se buscará información más precisa para las escalas espaciales de las estructuras observadas en la ionosfera terrestre, es decir, lo que se buscaría ahora es encontrar el tamaño físico de las estructuras proyectadas en el plano del cielo. Esto con la finalidad de empatarlo con el tiempo de tránsito de las mismas obtenido a partir de los *wavelets*.
- Generar valores de vTEC con una cadencia menor a 2 minutos y buscar comparar con datos

de Dst con una resolución temporal de minutos. Esto permitirá definir mejor las *wavelets* para las estructuras encontradas en cada evento.

- También se explorará el estudio de PI a través de imágenes con una cámara especial a ~ 630 nm en tiempo real, producto de otra colaboración entre el LANCE con el SRI Internacional y en colaboración conjunta con la Universidad de Boston, misma que será instalada en el observatorio MEXART en Coeneo, Michoacán. Con este instrumento se podrán hacer comparaciones en tiempo real del comportamiento del $vTEC$ y de su contraparte observacional a través de estas imágenes, lo que sin duda brindará un nuevo método de estudio e investigación en estos temas.
- Finalmente, aunque esto será a largo plazo, lo que queremos como grupo de investigación es proveer a México de su propio código ionosférico haciendo uso de nuestras propias estaciones y datos. Esto permitirá y ofrecerá a la Agencia Espacial Mexicana (AEM), tener un mejor control sobre el comportamiento ionosférico en territorio mexicano.

Apéndice

Las gráficas que aquí se presentan forman parte del análisis de las 18 tormentas geomagnéticas que tuvieron lugar desde el 2002 al 2004.

Cada una contiene información de dos latitudes: La primera pertenece a la ciudad de Ensenada y la segunda a la ciudad de Morelia. Dentro de cada gráfica se encuentran cinco paneles (a), b), c), d) y e)). El primer panel *a*) muestra una serie de tiempo del valor $vTEC$ así como su ajuste por medio del valor $mvTEC$ (mediana $vTEC$ de 27 días previos o 1 rotación solar). Debajo de ella *b*) la diferencia entre ambas series ($vTEC$ y $mvTEC$) así como el cálculo del índice W . Dentro del tercer panel *c*) se encuentra un espectrograma de potencias $vTEC^2$ donde existe un cono de significancia que descarta las potencias encerradas dentro del mismo. A un lado de este se encuentra el panel *d*) en el que se grafica la potencia $vTEC^2$ contra el periodo (en días) en lo que se le conoce como transformada de Fourier o espectro de Fourier, que de la misma forma que el espectro de potencias tiene un nivel de significancia del 95%. Por último, el panel *e*) es la varianza promedio asociada a la diferencia entre $vTEC$ y $mvTEC$ del segundo panel.

El lector puede encontrar información más detallada sobre cada una de estas 18 gráficas en la página 47.

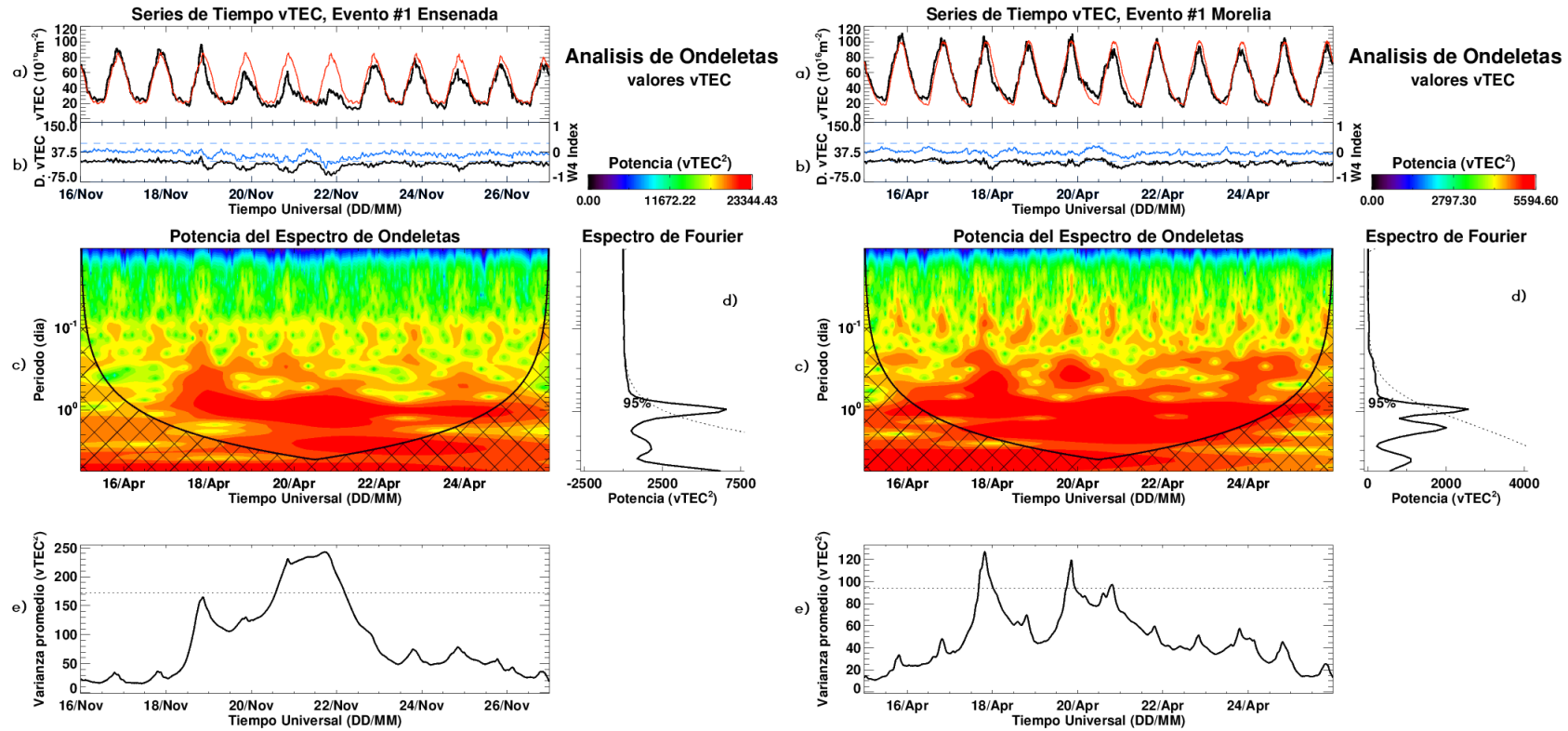


Figura 5.1: Método de *wavelets* aplicado al evento #1 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.1.

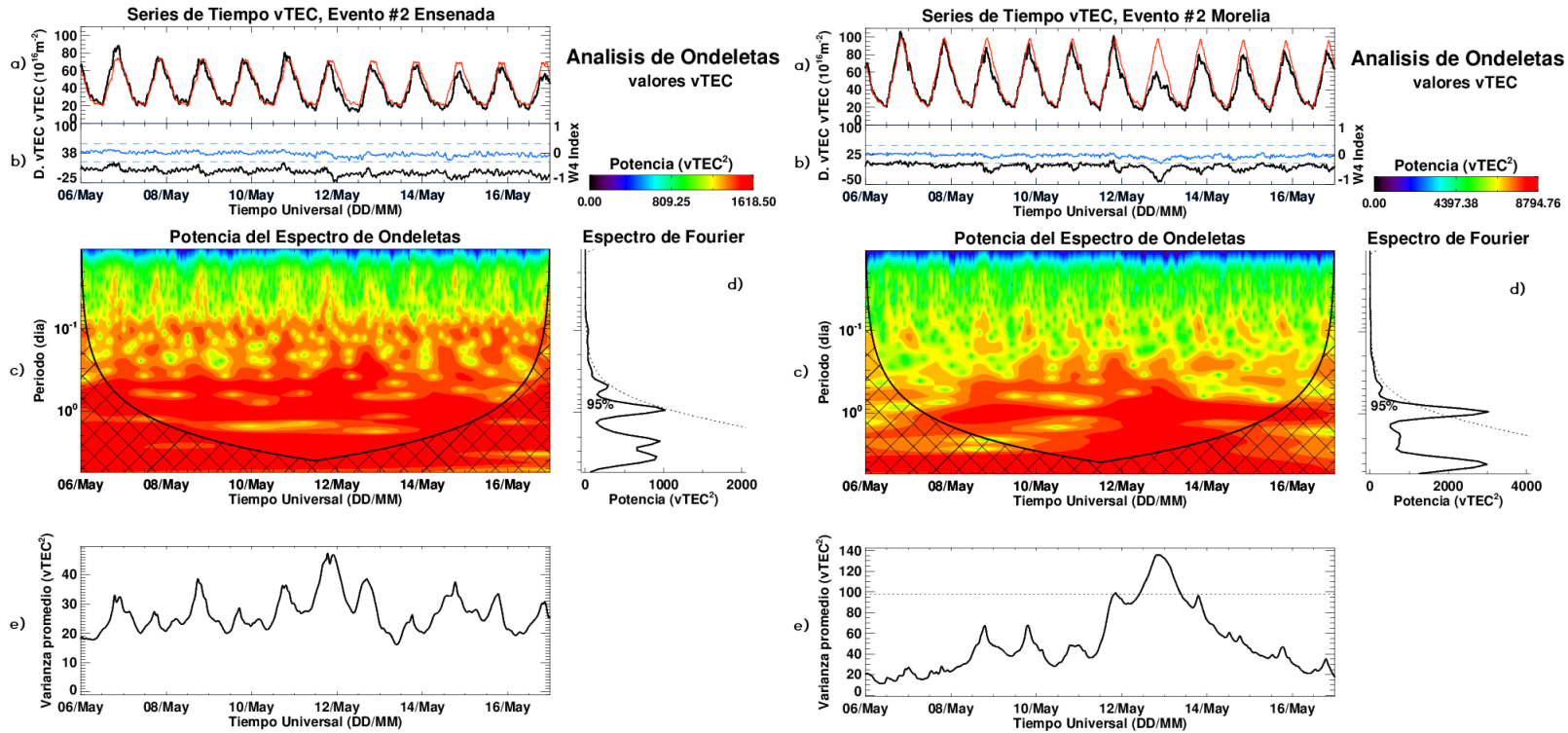


Figura 5.2: Método de *wavelets* aplicado al evento #2 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.2.

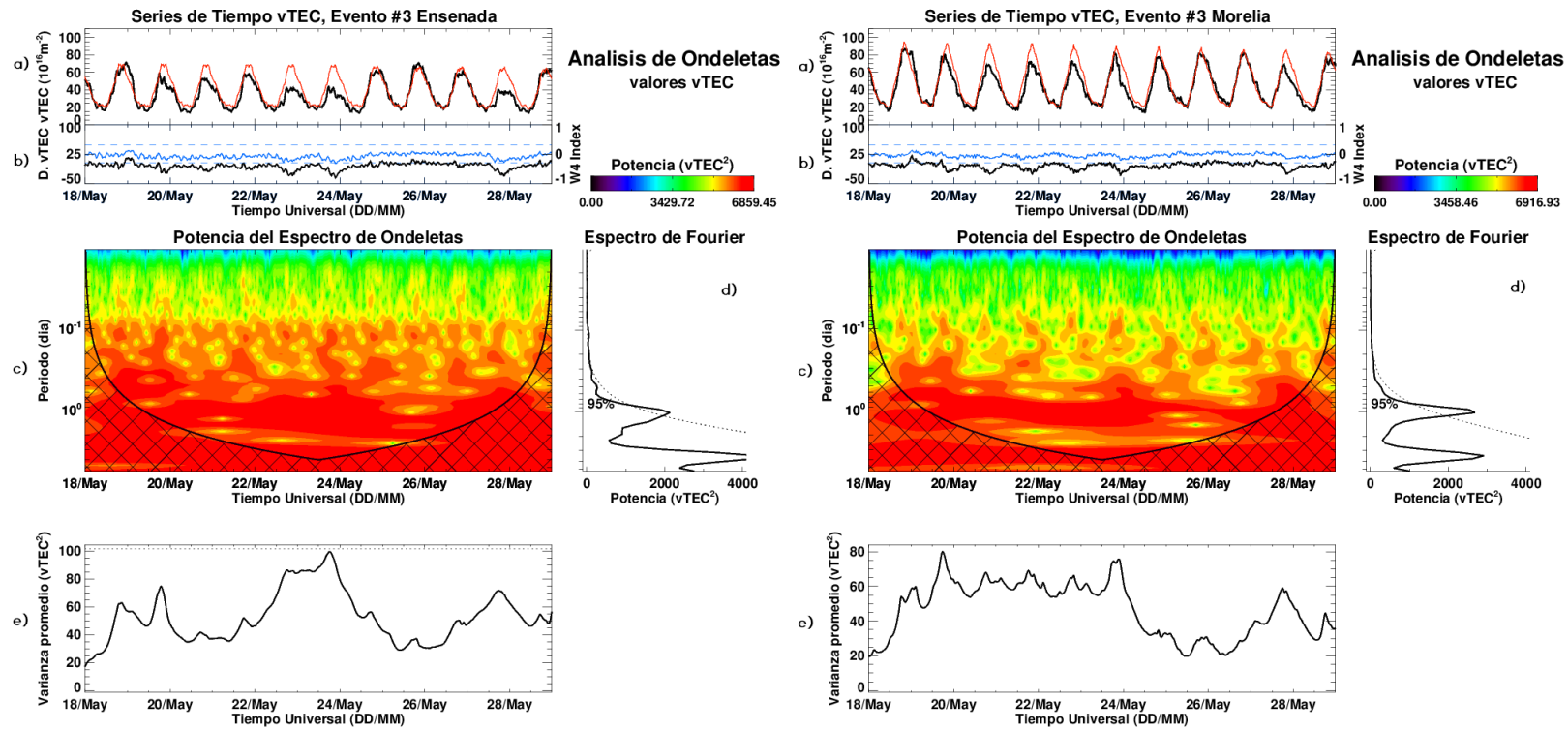


Figura 5.3: Método de *wavelets* aplicado al evento #3 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.3.

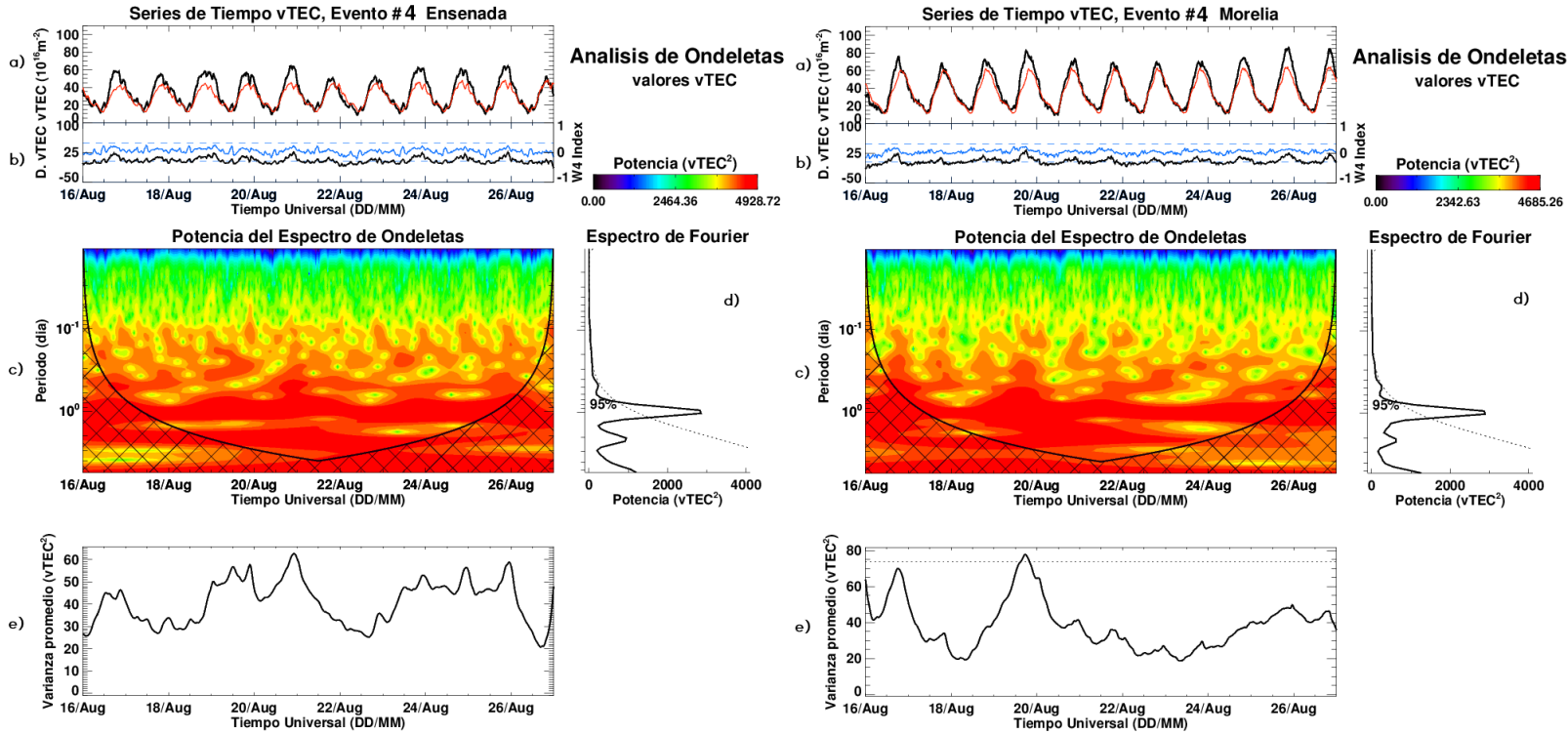


Figura 5.4: Método de *wavelets* aplicado al evento #4 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.4.

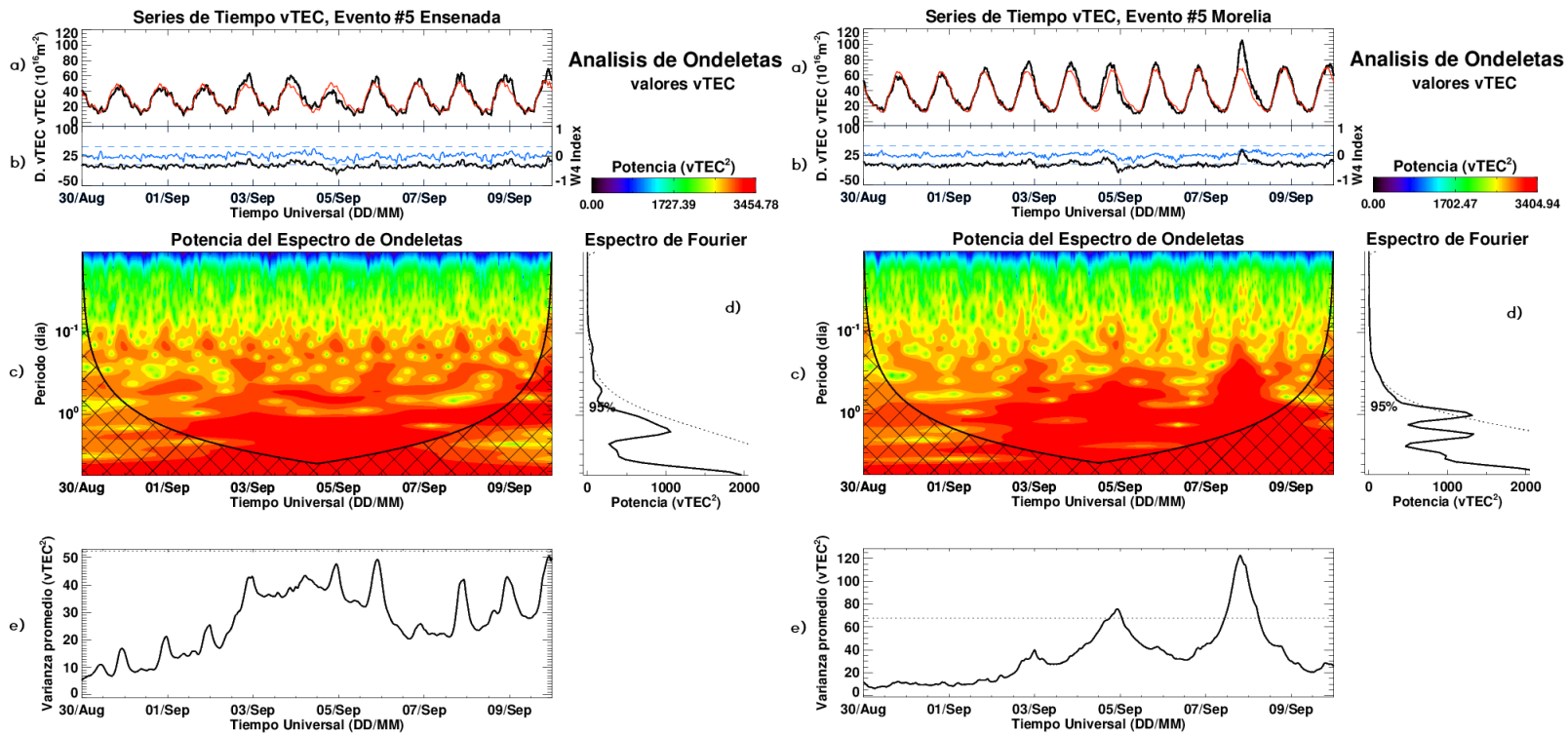


Figura 5.5: Método de *wavelets* aplicado al evento #5 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.5.

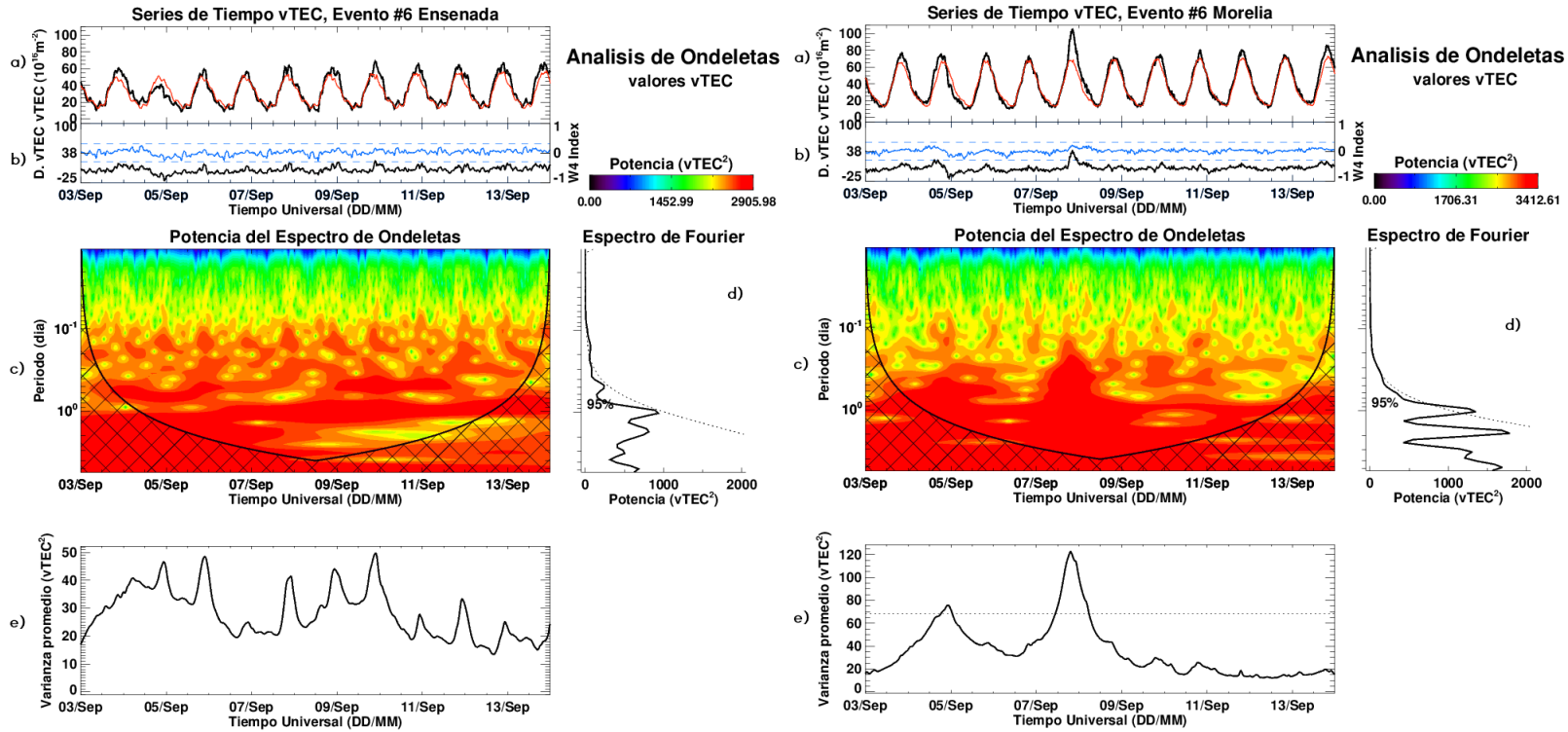


Figura 5.6: Método de *wavelets* aplicado al evento #6 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.6.

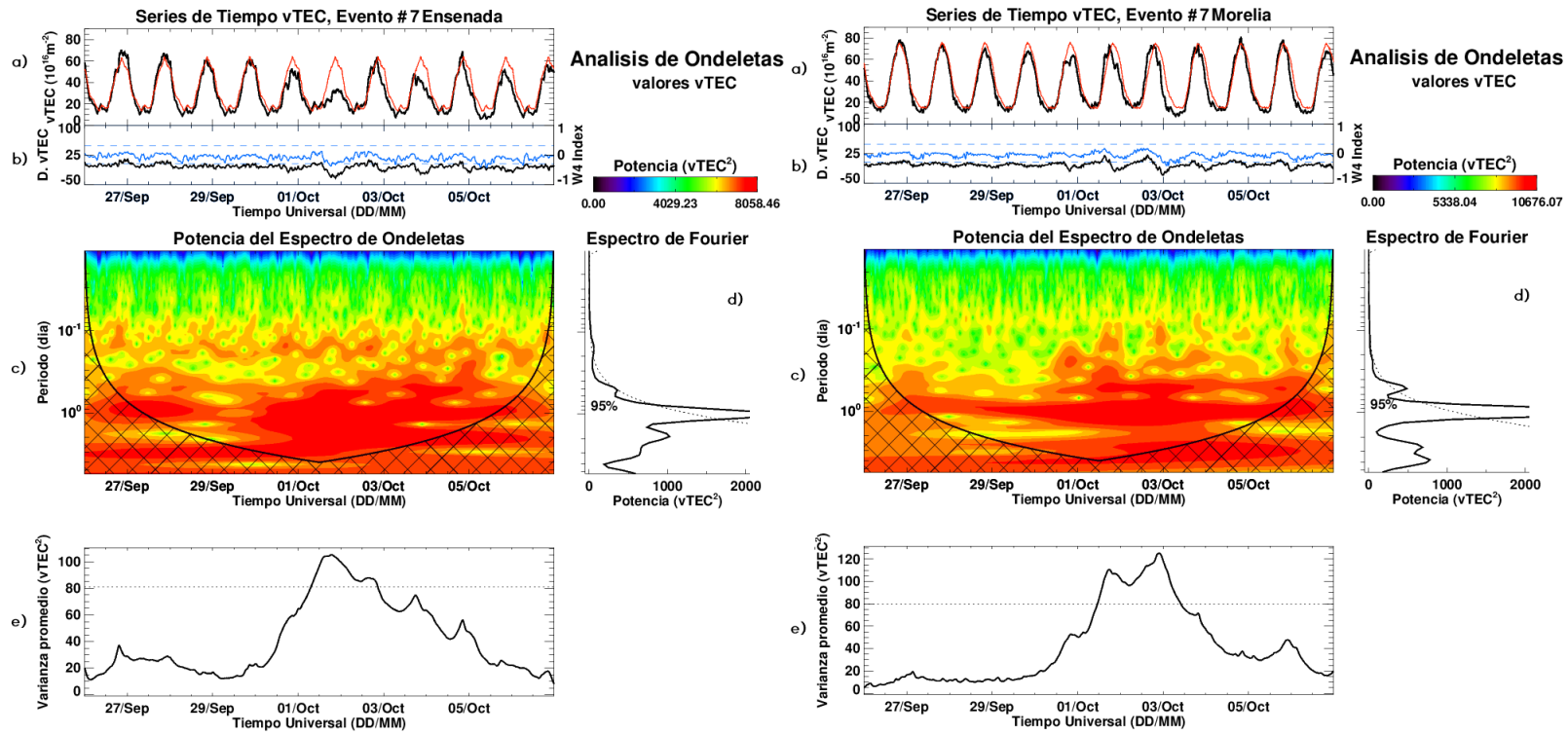


Figura 5.7: Método de *wavelets* aplicado al evento #7 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.7.

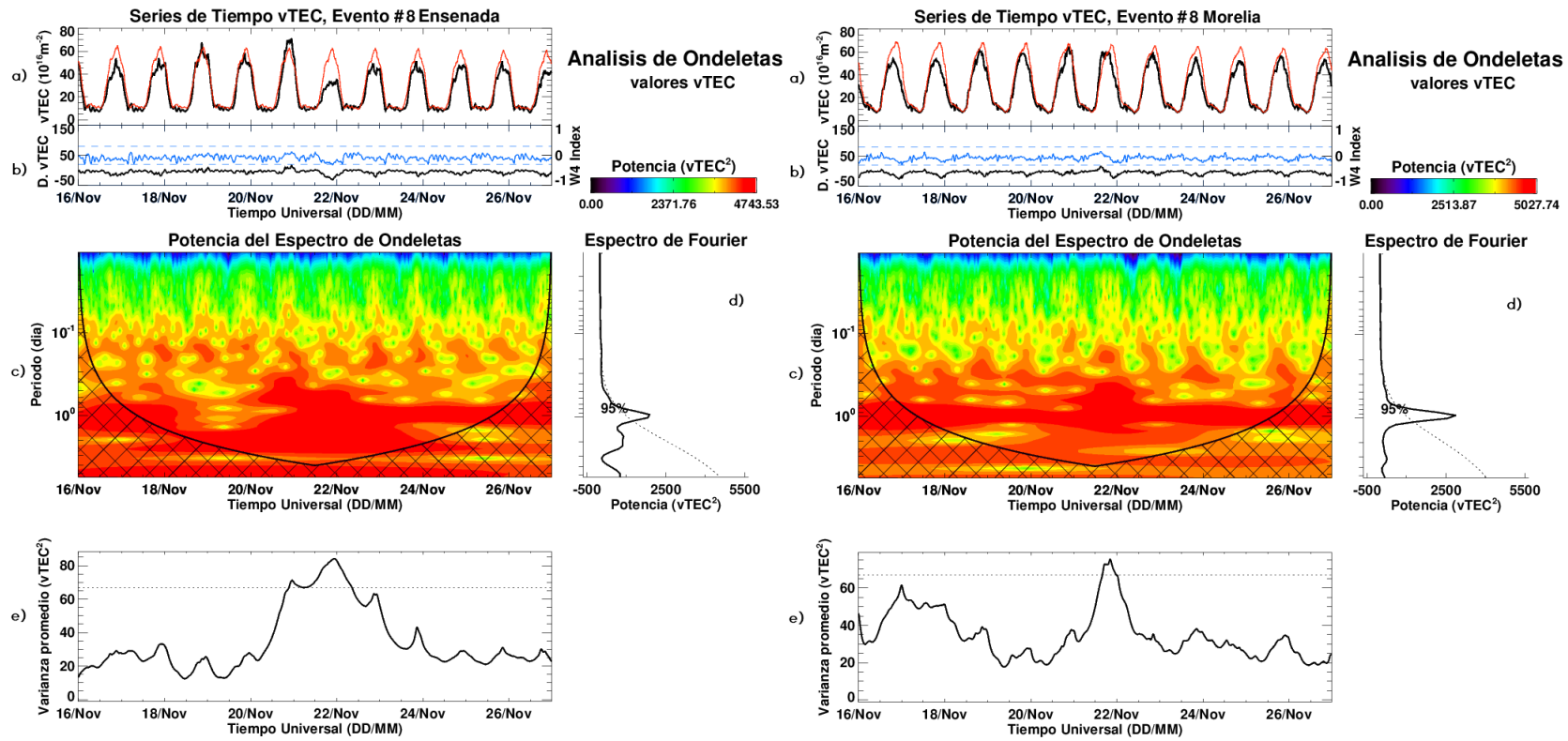


Figura 5.8: Método de *wavelets* aplicado al evento #8 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.1.8.

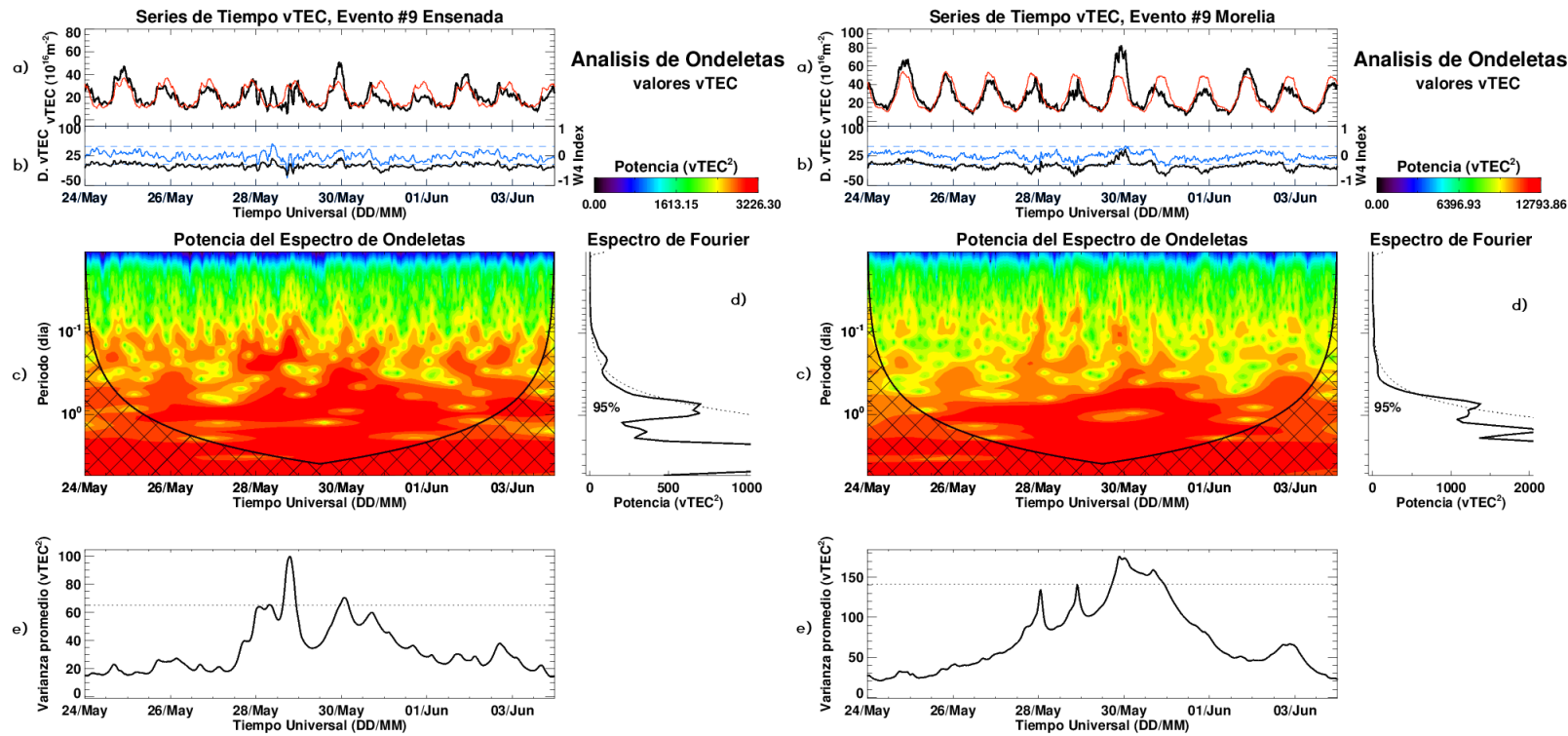


Figura 5.9: Método de *wavelets* aplicado al evento #9 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.1.

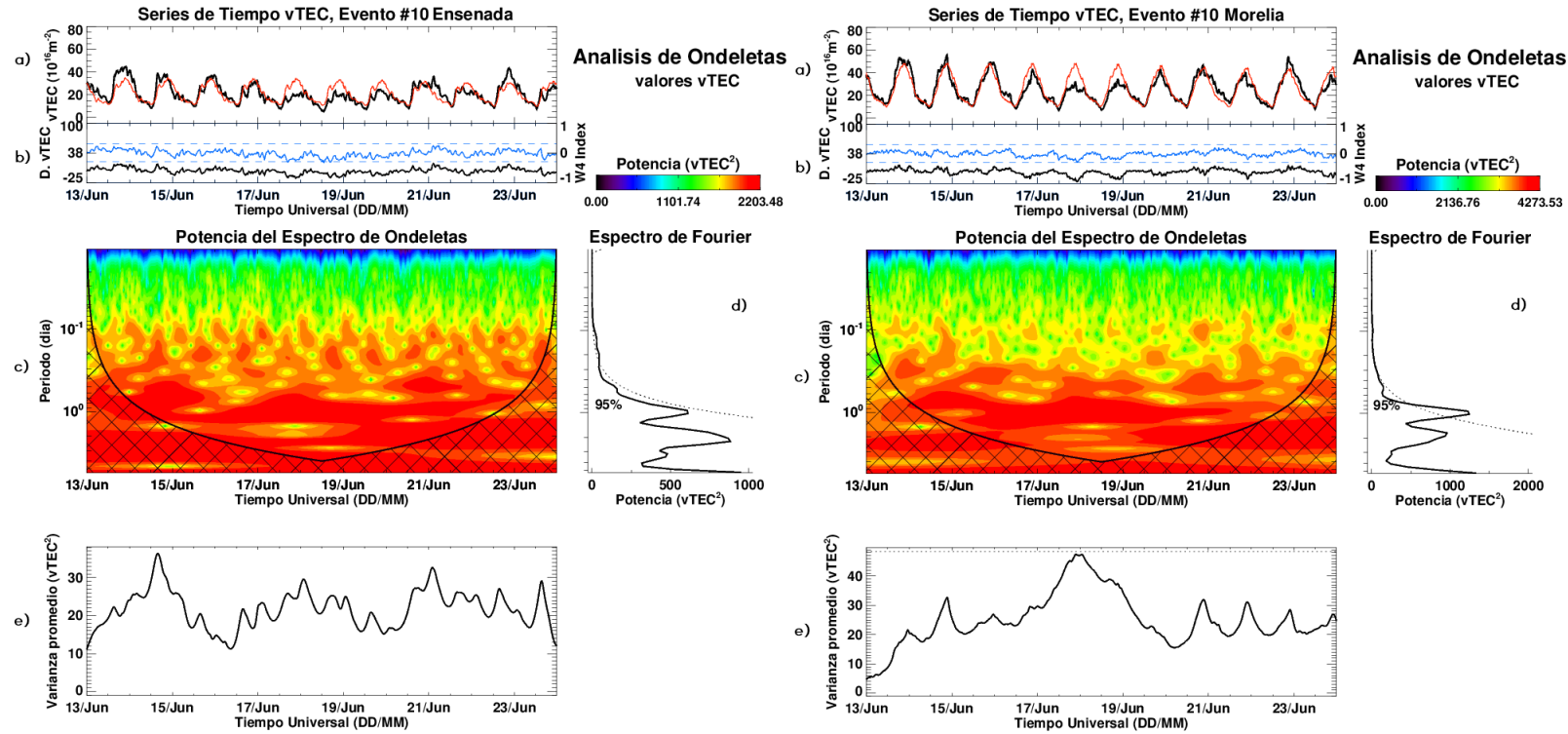


Figura 5.10: Método de *wavelets* aplicado al evento #10 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.2.

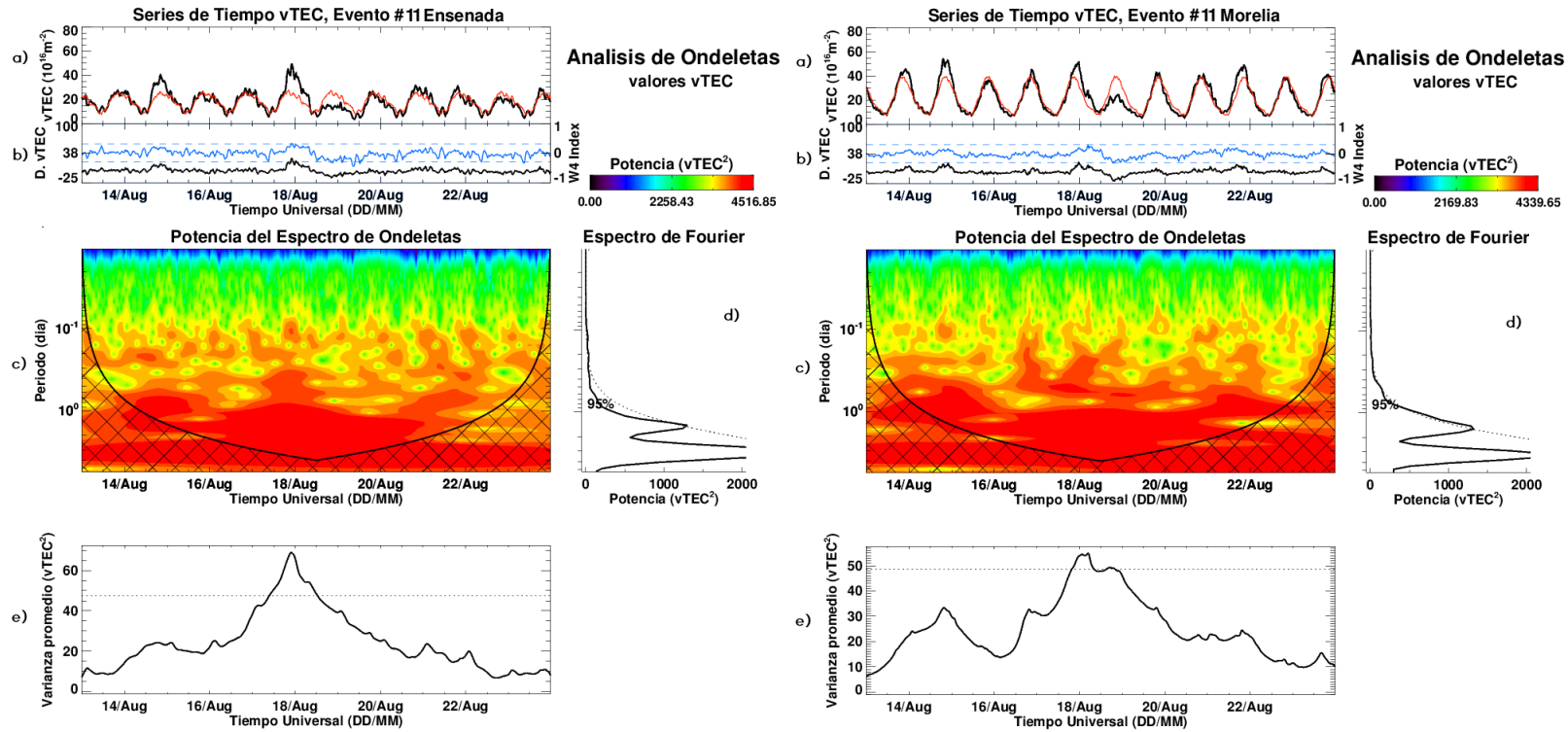


Figura 5.11: Método de *wavelets* aplicado al evento #11 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.3.

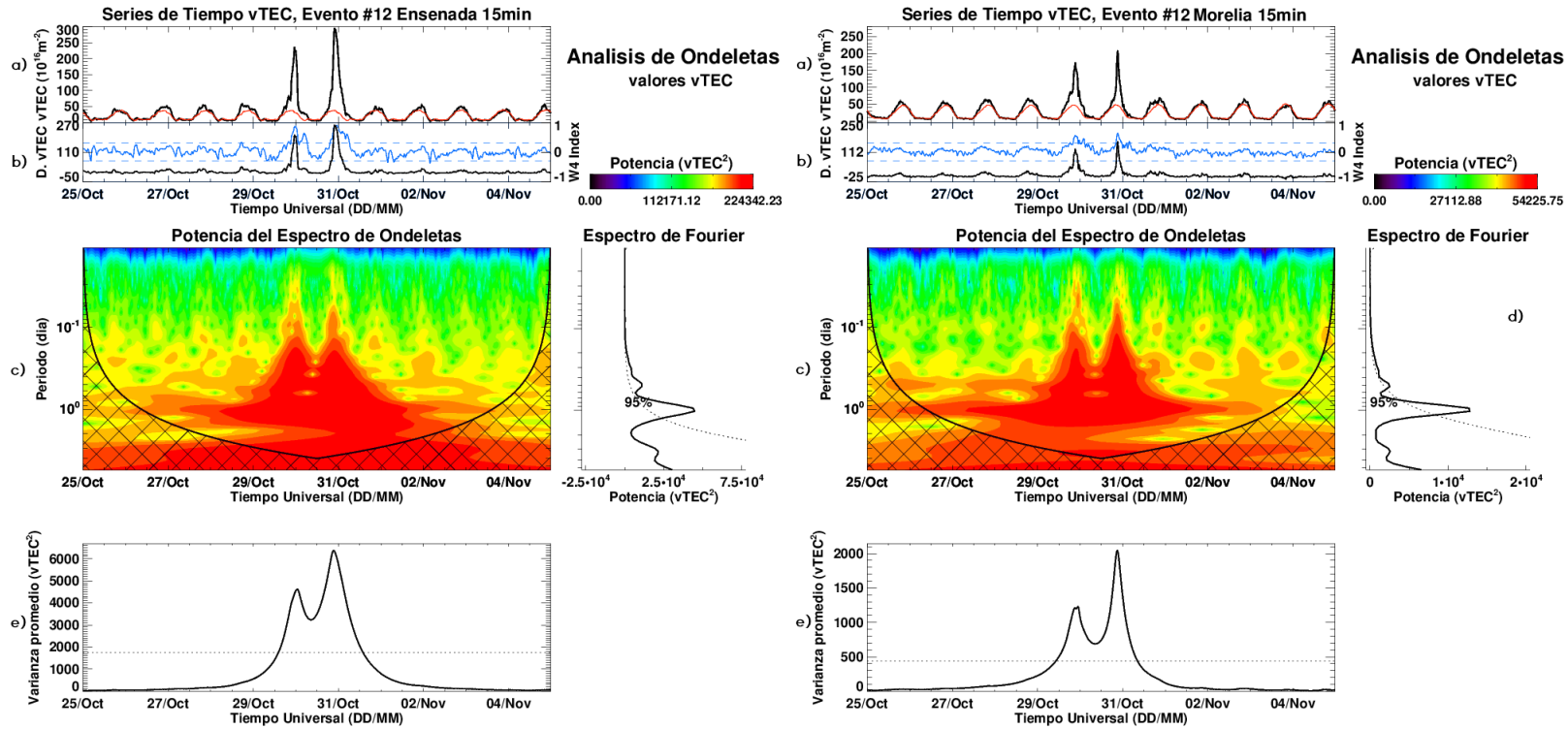


Figura 5.12: Método de *wavelets* aplicado al evento #12 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.4.

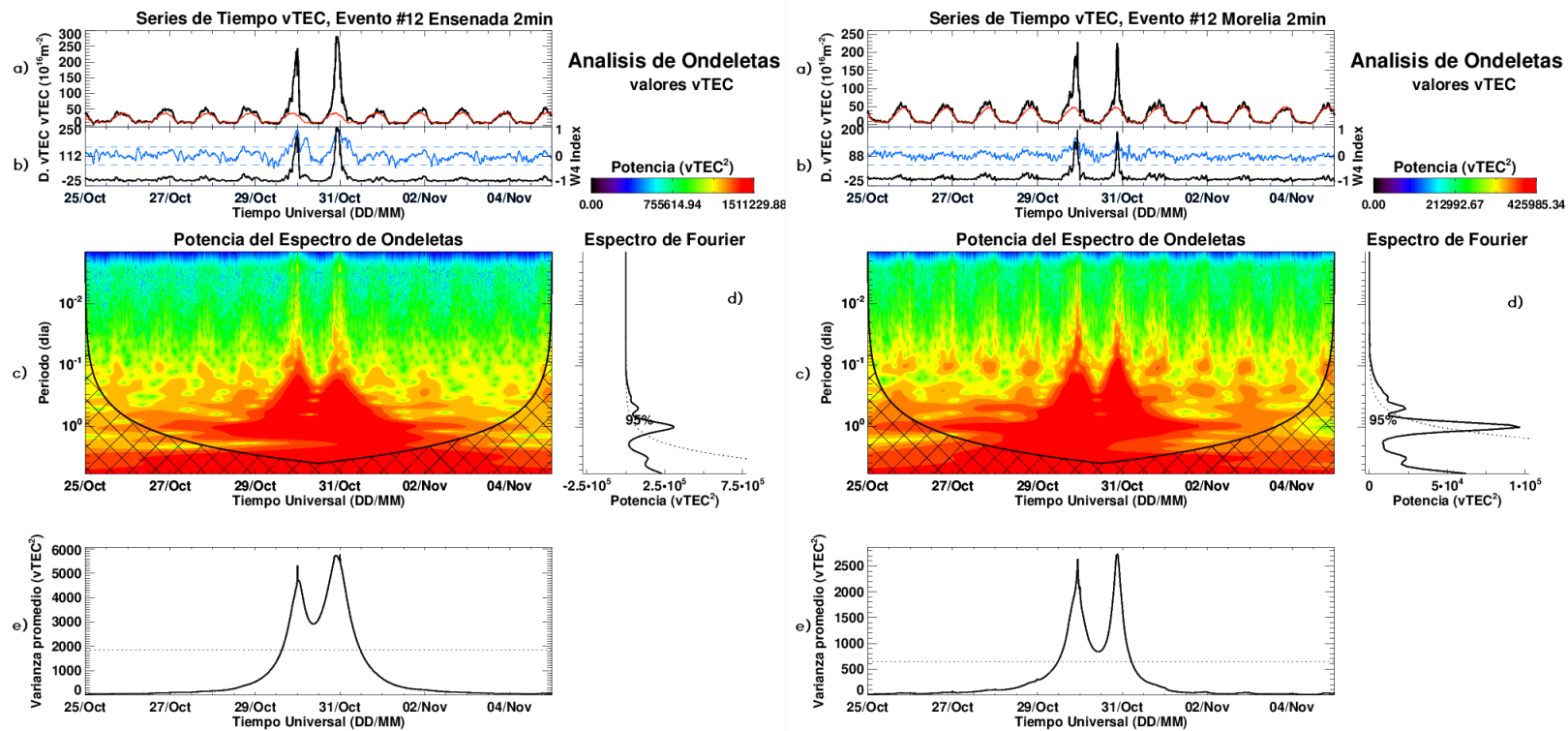


Figura 5.13: Método de *wavelets* aplicado al evento #12 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 2 minutos. Más información en la sección 4.2.4.

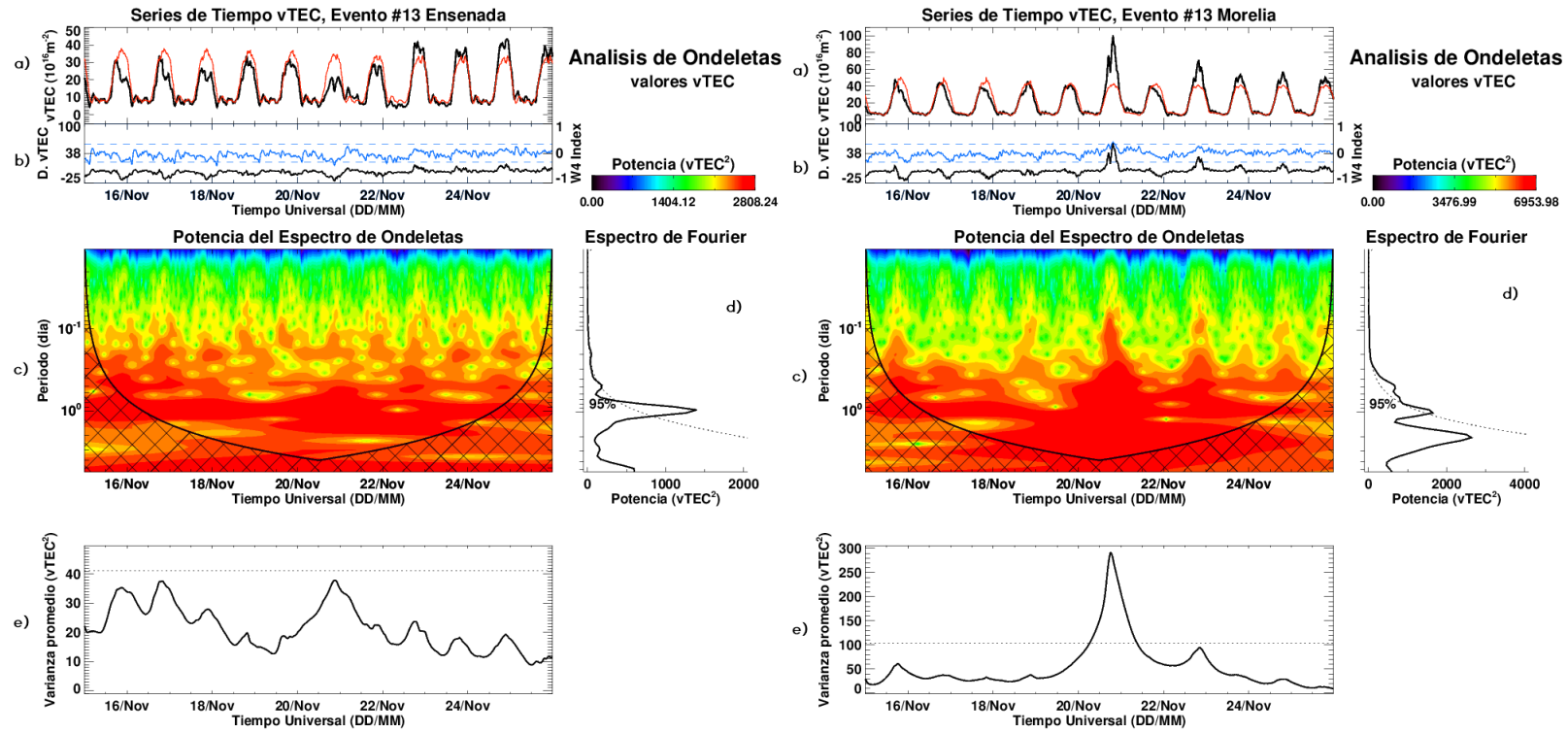


Figura 5.14: Método de *wavelets* aplicado al evento #13 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.2.5.

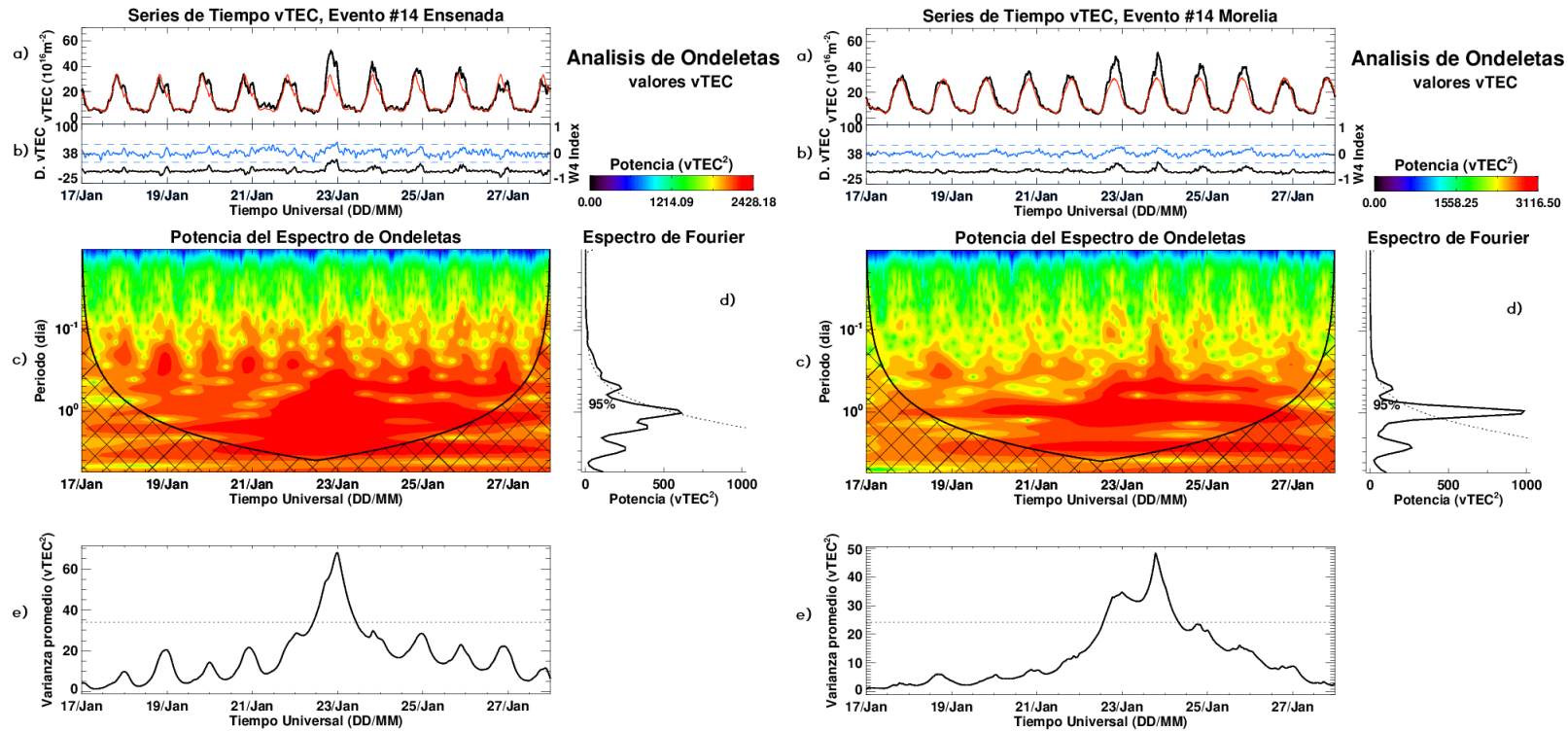


Figura 5.15: Método de *wavelets* aplicado al evento #14 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.1.

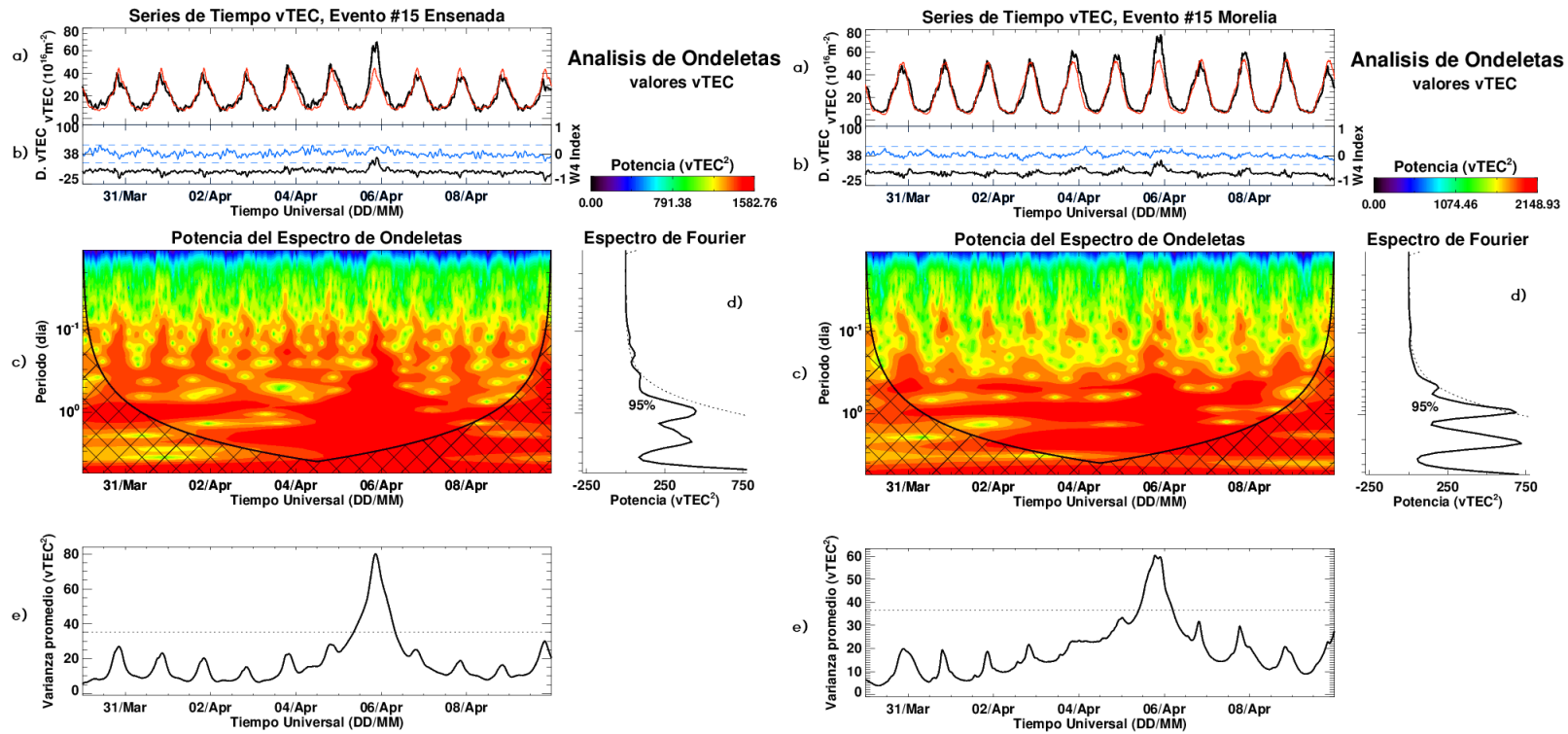


Figura 5.16: Método de *wavelets* aplicado al evento #15 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.2.

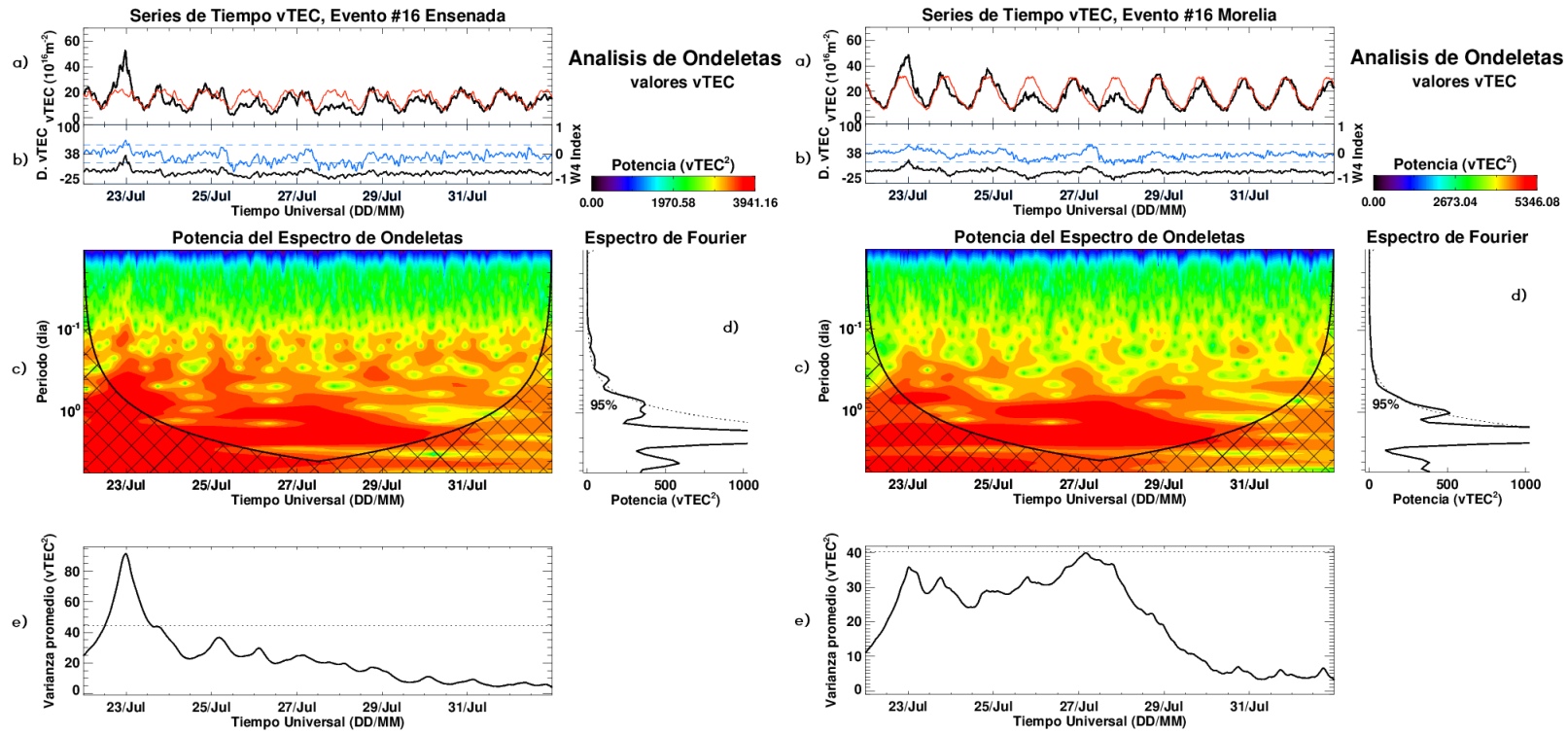


Figura 5.17: Método de *wavelets* aplicado al evento #16 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.3.

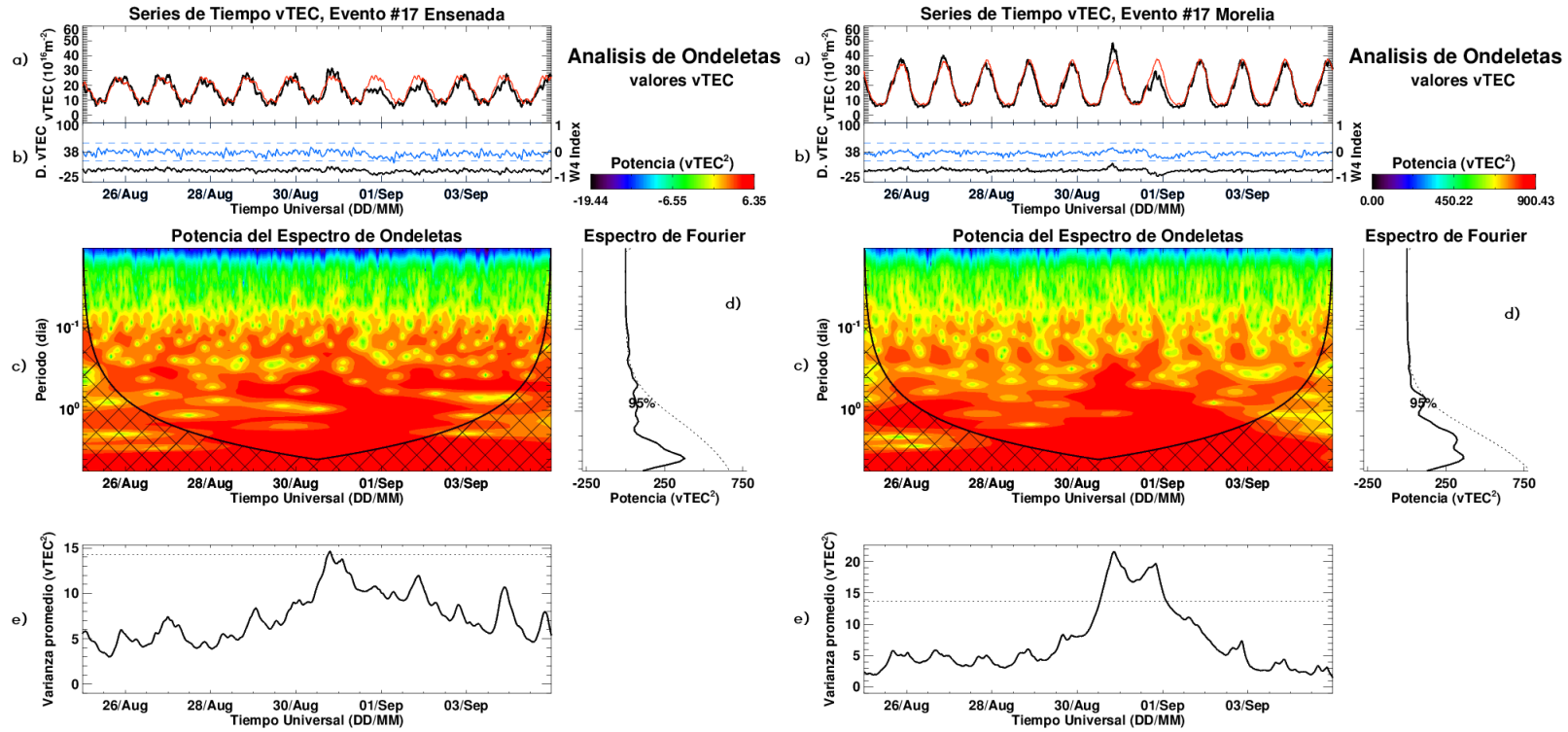


Figura 5.18: Método de *wavelets* aplicado al evento #17 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.4.

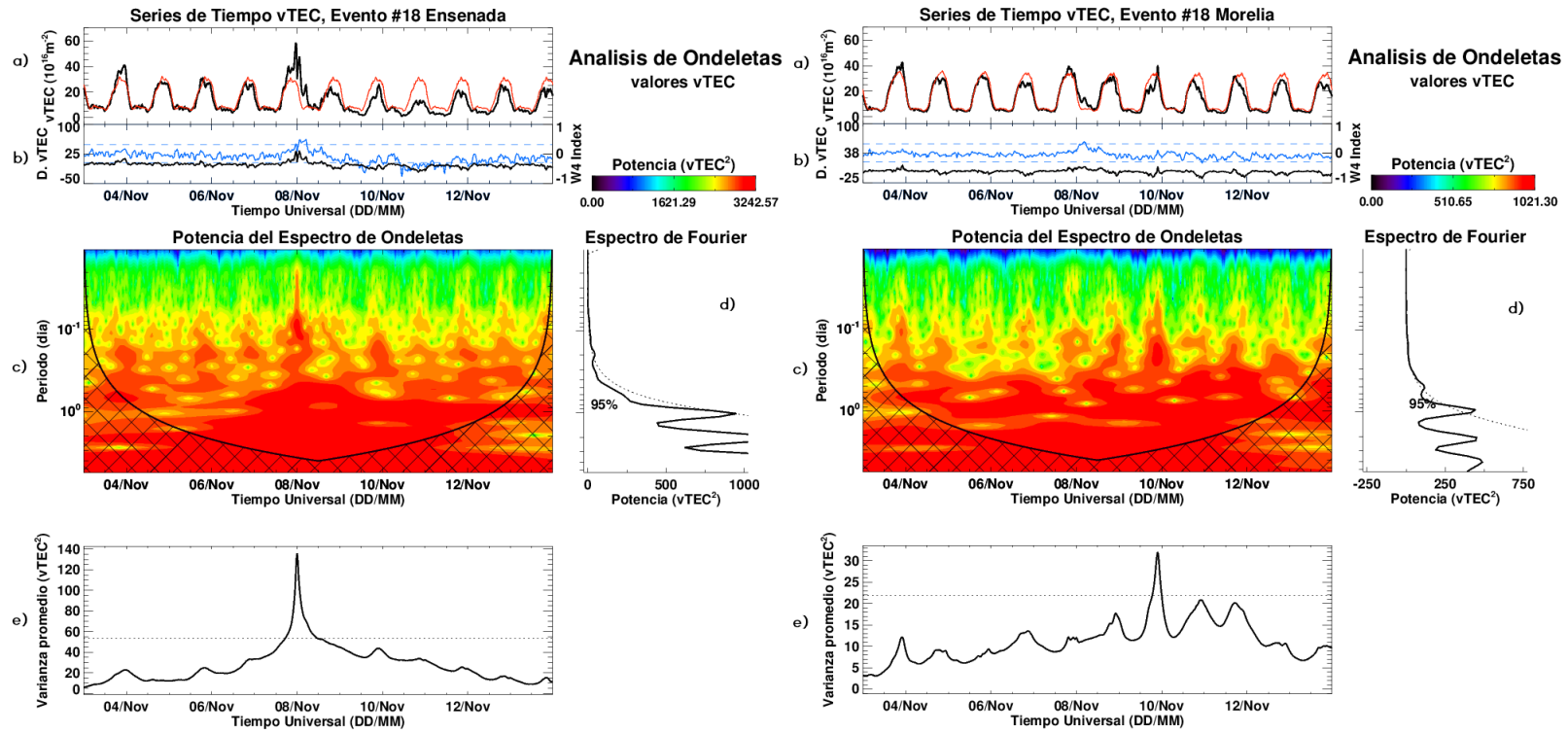


Figura 5.19: Método de *wavelets* aplicado al evento #18 para valores vTEC sobre latitudes y longitudes cercanas a las ciudades de Ensenada y Morelia. En ambos casos la tasa de valores de vTEC es 1 dato por cada 15 minutos. Más información en la sección 4.3.5.

Bibliografía

- Abidin, Z. H. (1992). *Computational and Geometrical Aspects of on-the-fly Ambiguity Resolution*. University of New Brunswick, Canada.
- Ashbrook J. (1984). *Richard Carrington and a Singular Appearance on the Sun*. The Astronomical Scrapbook, Cambridge, Massachusetts: Sky Publishing Corporation, ISBN:0-933346-24-7.
- Axford W. I. and Hines C. O. (1961). *A Unifying Theory of High-Latitude Geophysical Phenomena and Geomagnetic Storms, in the Upper Atmosphere in Motion*, Canadian Journal of Physics, **Vol. 39**, p. 1433-1464.
- Baumjohann, W., and Treumann, R. A. (1996). *Basic Plasma Space Physics*. Ontiveros, p. 329.
- Bilitza, D., Rawer, K., Bossy, L., & Gulyaeva, T. (1993). *International reference ionosphere—Past, present, and future: I. Electron density*. Advances in Space Research, **Vol. 13**, p. 3-13.
- Chen F. F. (1984). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, **Vol. 1**, p. 421.
- Christian R. E. (2012). *Coronal Mass Ejections*. NASA, Retrieved 9 July 2013.
- Cohen H. R. (1976). *Runaway Electrons in an Impure Plasma*. Physics of Fluids, **Vol. 19**, DOI: 10.1063/1.861451.
- Davies Kenneth (1990). *Ionospheric Radio*, Electromagnetic Waves Series 31, IET. ISBN: 0-86341-186-X.
- DelobEAU, F., and Lesh, J. R. (1971). *The environment of the earth*, p. 132, ISBN: 902770208X.
- Domingo R. y Vidal E. (2016). *Variación Diurna Estacional del Campo Geomagnético Registrado en el Observatorio de Huancayo*. Instituto de Geofísica del Perú, **Vol. 6**, p. 6.
- Eastman E. T. (1990). *Transition Regions in Solar System and Astrophysical Plasmas*. IEEE Transactions on Plasma Science, **Vol. 18**, p. 18-25.
- Echer E., Gonzalez W. D., and Tsurunani B. T. (2008). *Interplanetary Conditions Leading to Superintense Geomagnetic Storms ($Dst \leq 250$ nT) During Solar Cycle 23*. Geophysical Research Letters, **Vol. 35**, DOI: 10.1029/2007GL031755.
- Eddy A. J. (1976). *The Maunder Minimum* Science, New Series, **Vol. 192**, p. 1189-1202.
- Feldman U., Landi E. and Schwadron N. A. (2005). *On the Sources of Fast and Slow Solar Wind*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, **Vol. 110**, DOI: 10.1029/2004JA010918.
- Forcada S. J. (2013). *El Enigmático Ciclo de Actividad del Sol*. Astronomía No. 172, p. 30-37.
- Gende M., Brunini C., and Kleusberg A. (1998). *Use of a Regional Ionospheric Model in GPS Geodetic Applications*. Advances in Positioning and Reference Frames, **Vol. 118**, p. 277-282.
- González E. J. (1994). *Study of Heliospheric Shock Waves Observed by Ulysses Magnetometer In and Out of the Ecliptic Plane*. **Ph.D. thesis**, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, p. 1-244.

-
- González D. W., Tsurutani T. B. and Clua De Gonzalez L. A. (1999). *Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms*. Space Science Reviews. **Vol. 88**, DOI: 10.1023/A:1005260129098.
- Gopalswamy N., Lara, Al., Lepping, R. P., Kaiser, M. L., Berdichevsky, D., and Cyr, O.C. St., 2000, *Interplanetary Acceleration of Coronal Mass Ejections*, Geophysical Research Letters, **Vol. 27**, p. 145-148.
- Gopalswamy N. et al., (2009). *A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO*. Sun and Geosphere, **Vol. 4**, No.1.
- Gosling J. T., McComas D. J., Phillip J. L., and Bame S. J. (1991), *Geomagnetic Activity Associated with Earth Passage of Interplanetary Shock Disturbances and Coronal Mass Ejections*, Journal of Geophysical Research, **Vol. 96**, p. 7831-7839.
- Greenspan M. E., and Hamilton D. C. (2004). *A test of the Dessler-Parker-Sckopke Relation During Magnetic Storms*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, **Vol. 105**, p. 5419-5430.
- Gulyaeva, T. L., I. Stanislwska, and M. Tomasik (2008). *Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index*. Annales Geophysicae. **Vol. 26**.
- Gurtner W. and Lou E. (2007). *RINEX, The Receiver Independent Exchange Format-version 3.00*. Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Colorado, p. 22.
- Hathaway, David H. (2015). *The solar cycle*. Living Reviews in Solar Physics, **Vol. 12**, Number 1, p. 1-87.
- Hector L. G., and Schultz H. L. (1936). *The Dielectric Constant of Air at Radiofrequencies*. Journal of Applied Physics, **Vol. 7**, DOI:10.1063/1.1745374.
- Holman G. and Benedict S. (1996). *What is a solar flare?*, NASA Goddard Space Flight Center. Website: <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/flare.html>
- Howard R. *ESA's SOHO Fact Sheet*, Naval Research Laboratory in Washington DC, USA.
- Kelley M. C. (2009). *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press, **Vol. 96**, p. 556.
- Klobuchar A. J. (1987). *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, p. 325-331.
- Knipp, D. J., et al. (2016). *The May 1967 Great Storm and Radio Disruption Event: Extreme Space Weather and Extraordinary Responses*, Space Weather, **Vol. 14**, DOI:10.1002/2016SW001423.
- Komjathy, A. (1997). **Ph.D. Thesis**.
- Lang K. R. (2008). *The Sun from Space*, by Kenneth R. Lang, Springer, **Second Edition**, ISBN:978-3-540-76952-1.
- Loucas G. Christophorou, James Kenneth Olt-hoff (2004). *Fundamental Electron Interactions With Plasma Processing Gases*, p. 76 pages, ISBN: 0306480379
- Mallat S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, **Second Edition**, p. 668.
- McFadden, Lucy-Ann, Torrence Johnson, Weissman P. (2006). *Encyclopedia of the Solar System*, Academic Press, **Second Edition**.
- Menzel D. H., Fred W. L., and Gerard De Vaucouleurs (1970). *Survey of the Universe*. Englewood Cliffs, N.J., ISBN:01387916359780138791636.
- Miohels D., et al., (1995). *The Large Angel Spectroscopic Coronagraph (LASCO)*. Solar Physics, **Vol. 162**, p. 357-402.
- Moldwin, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.
- National Research Content, (1995) *Plasma Science: From Fundamental Research to Technological Applications*. ISBN:0-309-57777-2

-
- Nicky Fox. (2010). *Coronal Mass Ejections*, Goddard Space Flight Center NASA. Retrieved 2011-04-06.
- NRL plasma formulary (2013). *Supported by The Office of Naval Research*, p. 40.
- Prolss W. G. (2004) *Physics of the Earth's Space Environment*. Springer. DOI:10.1007/978-3-642-97123-5.
- Ratcliffe J. Ashworth (1972). *An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere*, Cambridge University Press, New York. ISBN:0-521-08341-9.
- Rodríguez-Martínez, M., Pérez-Enríquez, H. R., Carrillo-Vargas, A., López-Montes, R., Araujo-Pradere, E. A., Casillas-Pérez, G. A., & Cruz-Abeyro, J. A. (2014). *Ionospheric disturbances and their impact on IPS using MEXART observations*. *Solar Physics*, **Vol. 289**, p. 2677-2695.
- Russell T. C., Robert L. M., and Rande K. B. (1974). *On the cause of Geomagnetic Storm*. *Journal of Geophysical Research*, **Vol. 79**, p. 1105-1109.
- Schunk, Robert and Nagy Andrew (2009). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry*. Cambridge University Press. **Second Edition**.
- Sobotka M. (1999). *Fine Structures in sunspots. Motions in the Solar Atmosphere*. Springer Netherlands, p. 71-97.
- Solanki, S. K., Wenzler, T., & Schmitt, D. (2008). *Moments of the Latitudinal Dependence of the Sunspots Cycle: a new Diagnostic of Dynamo Models*. *Astronomy & Astrophysics*, DOI: 10.1051/0004-6361:20054282.
- Stanislawska I. and Gulyaeva T. (2015). *Ionospheric W Index Based on GNSS TEC in the Operational Use for Navigation Systems, Satellite Positioning - Methods, Models and Applications*, Prof. Shuanggen Jin (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/59902.
- Svalgaard L. (2013). *Solar Activity-Past, Present and Future*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, **Vol. 3**.
- Thome G. D. and L. S. Wagner (1971) *Electron Density Enhancements in the E and F Regions of the Ionosphere During Solar Flares*. *Journal Geophysical Research*, **Vol. 76**, DOI:10.1029/JA076i028p06883.
- Thompson W. B. (1964). *An Introduction to Plasma Physics*, **Second Edition**, University of Oxford, DOI:10.1016/0029-5582(65)90828-X.
- Tousey R. (1973). *The Solar Corona*. *Space Research Conference*, **Vol. 1**, p. 713-730.
- Tripathi Roopali and A. P. Mishra (2005). *Properties of HALO CME in Relation to Large Geomagnetic Storms*. *International Cosmic Ray Conference*, **Vol. 1**, p. 161.
- Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina, and S. Alex (2003), *The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859*, *J. Geophys. Res.*, **Vol. 108**, DOI:10.1029/2002JA009504
- Tsurunani T. B. et al., (2006). *Corotating Solar Wind Streams and Recurrent Geomagnetic Activity: a Review*. *Journal of Geophysics*. **Vol. 111**, DOI:10.1029/2005JA011273.
- US-TEC Technical Document (2004). Based on the MAGIC code written by Paul S.J. Spencer, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences University of Colorado, Boulder, Colorado. DOI:80309-0216.
- Vargas C, A., Enríquez P., Rodríguez Martínez M., López-Montes, R., Casillas-Pérez, G. A., & Araujo-Pradere, E. A. (2012). *Ionospheric disturbances detected by MEXART*. *Advances in Space Research*, **Vol. 49**, p. 1570-1580.
- Webb D.F., Cliver E.W., Crooker N.U., Cyr, O.C.St., and, Thompson B.J, (2000), *Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms*, *Journal of Geophysical Research*, **Vol. 105**, p. 7491-7508.

Webber, W. R. y McDonald, F. B. (2013). *Recent Voyager 1 data indicate that on 25 August 2012 at a distance of 121.7 AU from the Sun, Sudden and Unprecedented Intensity Changes were Observed in Anomalous and Galactic Cosmic Rays*. *Geophysics. Res. Lett.*

Welch, G. y Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. Department of Computer Science, University of North Carolina.

Williams, R. D. (2013). *Sun Fact Sheet*. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, MD20771. Retrieved 12 August 2013.

Wilson R. P. (1994) *Solar and Stellar Activity Cycles*. Cambridge Astrophysics Series. Press, **Vol. 24**, p. 279.

Woods N. T., and Francis G. E. (2006). *Solar Ultraviolet Variability During the TIMED Mission*. *Advances in Space Research*, **Vol. 37**, DOI: 10.1016/j.asr.2004.10.006.

Zou, L., Rishbeth, H., Müller-Wodarg, I. C. F., Aylward, A. D., Millward, G. H., Fuller-Rowell, T. J. and Moffett, R. J. (2000). *Annual and Semiannual Variations in the Ionospheric F2-layer. I. Modelling*. In *Annales Geophysicae* , **Vol. 18**, p. 927-944.