

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN



“Procesamiento y análisis de información geoespacial en busca de precursores sísmicos en la ionosfera en México”

*Tesis que para obtener el título de Maestro en
Ciencias de la Información
presenta*

Angela MELGAREJO MORALES

Directores:

Dr. Gpe. Esteban Vázquez Becerra

Dr. Arturo Yee Rendón

Culiacán Rosales, Sinaloa, México, septiembre del año 2017

Manifiesto ser la única autora de esta tesis. La presente es una copia exacta de la tesis, incluyendo cualquier revisión final requerida, según lo acordado por mis examinadores.

Entiendo que mi tesis puede estar disponible digitalmente para el público.

Resumen

En la presente tesis se expone un estudio sobre el comportamiento del Contenido Total de Electrones (TEC, por sus siglas en inglés) en la ionosfera en México durante diversos eventos sísmicos, esto con la finalidad de identificar posibles precursores sísmicos que contribuyan a estudios relacionados. Al ser la ionosfera terrestre un plasma, el TEC es el parámetro a calcular y analizar. Cuando en la ionosfera existen zonas de mayor o menor concentración de electrones la señal satelital, que la atraviesa, presenta un retraso en el tiempo de recorrido hasta el receptor. Este efecto permite, a través del uso de datos satelitales, el cálculo del TEC. El presente trabajo de investigación se realizó en cinco etapas: La primera etapa fue la recolección y organización de datos satelitales pertenecientes al Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) y de datos sísmicos. La segunda etapa corresponde al tratamiento de los datos GPS recabados, es decir, las transformaciones correspondientes y revisión de los mismos. La tercera etapa fue el cálculo del TEC, utilizando los datos recolectados en la etapa anterior, de un rango de días pertenecientes a diferentes eventos sísmicos. Posteriormente, la etapa cuatro consistió en la representación gráfica del TEC. Lo anterior se realizó por horas y por días en conjunto con su índice geomagnético D_{st} . También se generó un mapa global del TEC de los eventos y se representó, conjuntamente, la media, desviación estándar y varianza del TEC de todos los eventos. Finalmente, la etapa cinco consistió en realizar un riguroso análisis, en función del tiempo, del comportamiento del TEC, esto a través del estudio de las alteraciones en la amplitud de su variación antes, durante y después de un evento sísmico. Para la selección de los eventos sísmicos se utilizó el catálogo en línea del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) donde a través de la configuración de un filtro inteligente, ofrecido por dicho servicio, se consultaron aquellos eventos de magnitud mayor o igual a 5.1 ($M \geq 5.1$) registrados durante el período 2008 – 2015 en el estado de Oaxaca, México. En relación a los datos espaciales, estos se obtuvieron de diversas estaciones GPS pertenecientes a las siguientes redes geodésicas: TLALOCNet (UNAVCO), RGNA (INEGI) y CORS (NGS), en forma de archivos de navegación y de observación. Además, otro factor considerado en este estudio fue la actividad solar registrada en el año 2009, debido a que ese año el Sol, causante de ionización en la ionosfera por la fotoionización que provoca la radiación solar que emite, presentó una baja actividad. Lo anterior facilitó la elección de un día del año 2009 como referencia para evaluar los registros de TEC obtenidos en el presente estudio. Con base en los resultados obtenidos, se observó una alteración en el TEC, que supera los valores de días posteriores, antes del choque sísmico. Sin embargo, esto solamente es evidente y fiable en determinados casos. Por otra parte, algunas ganancias y pérdidas de TEC son equivalentes a las registradas los días anteriores al sismo. Se observó, además, que para ciertos casos existe una posible relación entre el aumento del TEC y el estado del índice geomagnético correspondiente. En general, los resultados indicaron que ciertas anomalías ionosféricas pueden ser observadas días antes de la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud mayor o igual a 5.1.

Abstract

In this thesis, a study is presented on the behavior of Total Electron Content (TEC) in the ionosphere in Mexico during various seismic events in order to identify possible seismic precursors that contribute to related studies. Since the terrestrial ionosphere is a plasma, the TEC is the parameter to be calculated and analyzed. When the ionosphere has areas of greater or lesser concentration of electrons, the satellite signal, that crosses it, presents a delay in the travel time to the receiver. This effect allows, through the use of satellite data, the calculation of the TEC. The present research was performed in five stages: The first stage was the collection and organization of satellite and seismic data. The second stage corresponds to the treatment of the collected GPS data. Therefore, the corresponding transformations and revision of data were realized. The third stage was the calculation of the TEC, using the data collected in the previous stage, from a range of days belonging to different seismic events. Subsequently, stage four consisted of the graphic representation of the TEC. This was done for hours and days in conjunction with its D_{st} index. A global TEC map of the events was also generated and the mean, standard deviation and TEC variance of all events were plotted. Finally, stage five consisted of a rigorous analysis, as a function of time, of the behavior of the TEC, this through the study of alterations in the amplitude of its variation before, during and after a seismic event. For the selection of seismic events with magnitude major or equal to 5.1 ($M \geq 5.1$) registered in Oaxaca during the period 2008 - 2015 the online filter offered by the National Seismological Service in Mexico (SSN, acronyms in spanish) was consulted. Regarding the spatial data, these were obtained from several GPS stations belonging to the following geodesic networks: TLALOCNet (UNAVCO), RGNA (INEGI) and CORS (NGS), in the form of navigation and observation files. In addition, another factor considered in this study was the solar activity recorded in the year 2009, because that year the Sun, which caused ionization in the ionosphere by the photoionization caused by the solar radiation emitted, presented a low activity. This facilitated the election of a day of the year 2009 as a reference to evaluate the TEC fact obtained in the present study. Based on the results obtained, an alteration in the TEC was observed, which overcome the values of the following days before the seismic shock. However, this is only evident and reliable in certain cases. On the other hand, some gains and losses of TEC are equivalent to those recorded in the days prior to the earthquake. It was also observed that for some cases there is a possible relation between the increase of the TEC and the state of the corresponding geomagnetic index. In general, the results indicate that certain ionospheric anomalies can be observed days before the occurrence of a seismic event of magnitude greater than or equal to 5.1.

Agradecimientos

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional. A Carlos A. Martínez por todas las risas y momentos felices que a tu lado he pasado.

Al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra y al Dr. Arturo Yee Rendón por haber creído en mí y hacer esto posible. Al Dr. Héctor Román Pérez Enríquez por su valiosa y agradable colaboración y enseñanza.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de Maestría.

A mis profesores y compañeros, por su contribución en forma de conocimiento y amistad.

Índice general

Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	6
1.3.1. General	6
1.3.2. Específicos	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Antecedentes	7
2. Marco teórico	12
2.1. El Sistema de Posicionamiento Global	12
2.1.1. Componentes del sistema	13
Segmento espacial	13
Segmento de control	15
Segmento de usuario	16
2.1.2. La señal GPS	17
Estructura de la señal	17

2.1.3.	Fuentes de error GPS	18
	Disponibilidad Selectiva (SA)	18
	Anti-Engaño (A-S)	19
	Refracción ionosférica	19
2.2.	La ionosfera terrestre	24
2.2.1.	Estructura de la ionosfera	26
	Región D	28
	Región E	28
	Región F	29
	Capa F2	30
2.2.2.	Perturbaciones ionosféricas	31
2.2.3.	Actividad solar y sus efectos en la ionosfera	33
	Tormentas magnéticas	33
2.3.	Contenido Total de Electrones	34
3.	Materiales y métodos	38
3.1.	Eventos sísmicos	39
3.2.	Datos del GPS	44
	3.2.1. Formato RINEX	46
3.3.	Cálculo del TEC	47
3.4.	Índice geomagnético D_{st}	50
3.5.	Representación de los datos	51
4.	Resultados y análisis	52
4.1.	Evento del 10/12/2011 (M = 5.2 <i>SSN</i>)	53
4.2.	Evento del 17/02/2012 (M = 5.3 <i>SSN</i>)	56
4.3.	Evento del 20/03/2012 (M = 5.2 <i>SSN</i>)	58
4.4.	Evento del 02/04/2012 (M = 6.0 <i>SSN</i>)	61

4.5. Evento del 13/04/2012 (M = 5.2 <i>SSN</i>)	64
4.6. Evento del 22/09/2012 (M = 5.4 <i>SSN</i>)	67
4.7. Evento del 29/09/2012 (M = 5.5 <i>SSN</i>)	70
4.8. Evento del 26/03/2013 (M = 5.4 <i>SSN</i>)	73
4.9. Evento del 09/03/2014 (M = 5.8 <i>SSN</i>)	76
4.10. Evento del 21/05/2014 (M = 5.8 <i>SSN</i>)	79
4.11. Evento del 24/05/2014 (M = 5.7 <i>SSN</i>)	82
4.12. Evento del 11/10/2014 (M = 5.6 <i>SSN</i>)	85
4.13. Evento del 28/04/2015 (M = 5.5 <i>SSN</i>)	88
5. Conclusiones	96
Referencias bibliográficas	99

Índice de tablas

1.1. Parámetros utilizados en la búsqueda de eventos sísmicos a través del catálogo del SSN.	4
1.2. Eventos sísmicos registrados por el SSN, durante el período 01/01/2008 al 31/12/2015, utilizando los parámetros de la Tabla 1.1 . Los resultados pueden variar a partir del momento de búsqueda. Fecha de consulta: 21 de marzo de 2017.	5
1.3. Eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 5.1 ($M \geq 5.1$).	5
1.4. Clasificación de acuerdo a Ikeya (2004) de las declaraciones sobre precursores sísmicos recolectados por Wadatsumi (1995).	8
2.1. Ejemplos de técnicas para monitorear la ionosfera.	25
2.2. Altitudes de la ionosfera de acuerdo a diversos autores. N/D equivale a No Disponible.	26
2.3. Regiones y capas de la ionosfera de acuerdo a Pulinets y Boyarchuk (2004).	31
2.4. Fenómenos vinculados con el estado del Contenido Total de Electrones.	36
2.5. Retardos ionosféricos en el cénit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) del TEC para distintas frecuencias. Fuente: Sardón et al. (1993).	37
3.1. Número de terremotos y energía liberada por año. Fuente: Pulinets y Boyarchuk (2004).	40
3.2. Eventos sísmicos seleccionados. Estos eventos se registraron en Oaxaca, México durante el período 2008 - 2015. El día/mes/año/hora/minuto son: la hora exacta del sismo (hora local); Latitud Norte y Longitud Oeste: las coordenadas geográficas del epicentro en grados. Con asterisco (*) los eventos considerados como réplicas y con P se denota la profundidad.	41

3.3. Relación de la variación de las magnitudes de los eventos sísmicos en estudio.	42
3.4. Relación de los eventos sísmicos estudiados por año y su magnitud máxima registrada. Para el año 2012 las réplicas no fueron contadas.	43
3.5. Coordenadas de los receptores GPS seleccionados en Oaxaca, México. Fuente: UNAVCO e INEGI.	45
3.6. Disponibilidad por estación para el rango de días en estudio.	45
4.1. Registros máximos de VTEC del evento número nueve.	54
4.2. Registros máximos de VTEC del evento número nueve sin considerar la variación diurna.	55
4.3. Registros máximos de VTEC del evento número diez.	57
4.4. Registros máximos de VTEC del evento número diez sin considerar la variación diurna.	57
4.5. Registros máximos de VTEC del evento número once.	59
4.6. Registros máximos de VTEC del evento número once sin considerar la variación diurna.	60
4.7. Registros máximos de VTEC del evento número doce.	62
4.8. Registros máximos de VTEC del evento número doce sin considerar la variación diurna.	63
4.9. Registros máximos de VTEC del evento número trece.	65
4.10. Registros máximos de VTEC del evento número trece sin considerar la variación diurna	66
4.11. Registros máximos de VTEC del evento número catorce.	68
4.12. Registros máximos de VTEC del evento número catorce sin considerar la variación diurna.	69
4.13. Registros máximos de VTEC del evento número quince.	71
4.14. Registros máximos de VTEC del evento número quince sin considerar la variación diurna.	72
4.15. Registros máximos de VTEC del evento número diecisiete.	74
4.16. Registros máximos de VTEC del evento número diecisiete sin considerar la variación diurna.	75

4.17. Registros máximos de VTEC del evento número dieciocho.	77
4.18. Registros máximos de VTEC del evento número dieciocho sin considerar la variación diurna.	78
4.19. Registros máximos de VTEC del evento número diecinueve.	80
4.20. Registros máximos de VTEC del evento número diecinueve sin considerar la variación diurna.	81
4.21. Registros máximos de VTEC del evento número veinte.	83
4.22. Registros máximos de VTEC del evento número veinte sin considerar la variación diurna.	84
4.23. Registros máximos de VTEC del evento número veintitrés.	86
4.24. Registros máximos de VTEC del evento número veintitrés sin considerar la variación diurna.	87
4.25. Registros máximos de VTEC del evento número veinticuatro.	89
4.26. Registros máximos de VTEC del evento número veinticuatro sin considerar la variación diurna.	90

Índice de figuras

1.1. Estaciones GPS en los estados de interés. TLALOCNet (UNAVCO) de rojo, CORS (NGS) de azul y RGNA (INEGI) de amarillo.	4
2.1. Ilustración de los satélites que conforman el Segmento Espacial del sistema NAVSTAR GPS. Fuente: http://www.gps.gov/	14
2.2. Ubicación de las instalaciones que integran al OCS. Fuente: http://www.gps.gov/	16
2.3. Geometría para el retardo de la trayectoria ionosférica (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).	23
2.4. Capas inferiores de la atmósfera de la Tierra (Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration and United States Air Force, 1976).	24
2.5. Ilustración de las diferentes regiones de la ionosfera y sus poblaciones de iones predominantes en sus respectivas alturas sobre el suelo. Se observa como la densidad en la ionosfera varía considerablemente. Fuente: Anderson y Fuller-Rowel (1999).	27
2.6. Ilustración de la densidad de electrones en una trayectoria vertical (VTEC). Fuente: http://iono-gnss.kmitl.ac.th	35
2.7. Ilustración del TEC Inclinado de un satélite a un receptor. Fuente: http://iono-gnss.kmitl.ac.th	35
3.1. El número de eventos anuales (eje horizontal), la magnitud (eje izquierdo) y la energía en equivalente de trinitrotolueno (eje derecho) liberados anualmente por la actividad sísmica de la Tierra. Fuente: Pulinets y Boyarchuk (2004).	40
3.2. Mapa con la distribución de las diferentes magnitudes registradas durante los eventos sísmicos en estudio (incluye réplicas).	42

3.3. Mapa con la distribución del total de eventos sísmicos con base en su año de registro (incluye réplicas).	43
3.4. Estaciones GPS seleccionadas. Redes geodésicas: TLALOCNet de rojo, NGS (CORS) de azul y RGNA de amarillo.	44
4.1. Evento sísmico número nueve. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	53
4.2. Evento sísmico número nueve. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	54
4.3. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número uno por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	55
4.4. Evento sísmico número diez. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	56
4.5. Evento sísmico número diez. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	57
4.6. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diez por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	58
4.7. Evento sísmico número once. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	59
4.8. Evento sísmico número once. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	60
4.9. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número once por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	61
4.10. Evento sísmico número doce. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	62
4.11. Evento sísmico número doce. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	63
4.12. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número doce por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	64
4.13. Evento sísmico número trece. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	65
4.14. Evento sísmico número trece. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	66

4.15. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número trece por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	67
4.16. Evento sísmico número catorce. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	68
4.17. Evento sísmico número catorce. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	69
4.18. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número catorce por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo. . .	70
4.19. Evento sísmico número quince. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	71
4.20. Evento sísmico número quince. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	72
4.21. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número quince por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	73
4.22. Evento sísmico número diecisiete. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	74
4.23. Evento sísmico número diecisiete. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	75
4.24. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diecisiete por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo. . .	76
4.25. Evento sísmico número dieciocho. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	77
4.26. Evento sísmico número dieciocho. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	78
4.27. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número dieciocho por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo. . .	79
4.28. Evento sísmico número diecinueve. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	80
4.29. Evento sísmico número diecinueve. Comportamiento del VTEC sin conside- rar la variación diurna.	81
4.30. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diecinueve por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo. . .	82

4.31. Evento sísmico número veinte. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	83
4.32. Evento sísmico número veinte. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	84
4.33. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veinte por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	85
4.34. Evento sísmico número veintitrés. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	86
4.35. Evento sísmico número veintitrés. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	87
4.36. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veintitrés por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	88
4.37. Evento sísmico número veinticuatro. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.	89
4.38. Evento sísmico número veinticuatro. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.	90
4.39. VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veinticuatro por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.	91
4.40. Media, desviación estándar y varianza del VTEC del conjunto de eventos en estudio.	92
4.41. Mapa del VTEC del conjunto de eventos en estudio. El eje de las X representa el rango de días en estudio y el eje de las Y el evento sísmico.	93
4.42. Mapa del VTEC del conjunto de eventos en estudio sin considerar la variación diurna. El eje de las X representa el rango de días en estudio y el eje de las Y el evento sísmico.	93
4.43. Registros máximos de VTEC (en rojo) por día en conjunto con su media (en azul).	94
4.44. Registros máximos de VTEC (en rojo) por día en conjunto con su media (en azul).	95

Lista de acrónimos

A-S	<i>Anti-Spoofing</i>
CORS	<i>Continuously Operating Reference Station</i>
DoD	<i>United States Department of Defense</i>
EE.UU.	Estados Unidos
GIM	<i>Global Ionosphere Maps</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
INEGI	Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática
M	Magnitud sísmica
MCS	<i>Master Control Station</i>
MS	<i>Monitor Station</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSAT	<i>Navy Navigation Satellite System</i>
NAVSTAR GPS	<i>Navigation System Timing And Ranging - Global Positioning System</i>
NGS	<i>National Geodetic Survey</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OCS	<i>Operational Control Segment</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRN	<i>Pseudorange Random Noise</i>
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa
RINEX	<i>Receiver INdependent EXchange</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SD	<i>Selective Denial</i>
SID	<i>Sudden Ionospheric Disturbance</i>
SPS	<i>Standar Positioning Service</i>
SSN	Servicio Sismológico Nacional
STEC	<i>Slant Total Electron Content</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TID	<i>Travelling Ionospheric Disturbance</i>
UNAVCO	<i>University-governed Consortium</i>
UT	<i>Universal Time</i>
uTEC	unidades de Contenido Total de Electrones
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>

Capítulo 1

Introducción

Debido a la existencia de fenómenos de naturaleza diversa que suelen ocurrir o aumentar su frecuencia momentos previos a un terremoto el dilema de la búsqueda y detección de precursores sísmicos sigue siendo una de las principales tareas sin resolver de la física moderna. Recientemente, la técnica GPS ha proporcionado una muy buena oportunidad para estudiar los efectos sismo ionosféricos (Zakharenkova y Shagimuratov, 2009). Motivando de esta manera un gran interés en la investigación de variaciones en la densidad de electrones causados por procesos sísmicos en la ionosfera. La historia de los efectos sismo ionosféricos y de las anomalías ionosféricas observadas durante la zona de preparación de un terremoto cuenta con más de cincuenta años (Pulinets y Davidenko, 2014). Diversos mecanismos físicos pueden alterar el estado de la ionosfera, produciendo el registro y observación de comportamientos irregulares en esta capa de la atmósfera terrestre, incluso factores no relacionados a la actividad sísmica pueden cambiar los valores de TEC en la ionosfera (Zaslavski et al., 1998). Es por esto que a través de los años se han formulado una serie de hipótesis que tratan de dar explicación a las anomalías ionosféricas: De acuerdo a Zaslavski et al. (1998) estas anomalías podrían estar relacionadas con una redistribución de las cargas eléctricas en la superficie de la Tierra y luego en su sistema atmosférico. La penetración directa de campos electromagnéticos es mencionada por Molchanov et al. (1995) y del campo cuasi-electrostático (QE, por sus siglas en inglés) por Pierce (1976). Algunas de estas hipótesis fueron planteadas en los trabajos considerados como los Antecedentes (Ver **Sección 1.5**) de la presente tesis; por ejemplo, en Molchanov y Hayakawa (1998) se informó acerca del efecto de turbulencia de las ondas de gravedad (GW, por sus siglas en inglés) como un agente de perturbación ionosférico basado en la observación de señales sub-ionosféricas de frecuencia muy baja (VLF, siglas en inglés), esta teoría tiene relación con la liberación de gases en la zona de preparación en la corteza por encima del

terremoto (Hobara y Parrot, 2005). Una hipótesis prometedora para explicar estas perturbaciones ionosféricas está relacionada con la acción del campo eléctrico. Debido al estrés de las rocas, las cargas eléctricas podrían aparecer en la superficie de la Tierra y cambiar las corrientes en el sistema de la atmósfera-ionosfera (Pulinets et al., 2003); razón por la cual la corriente en la ionosfera modifica la concentración de electrones, tales apariciones de cargas eléctricas en la superficie de la Tierra han sido observadas por testigos durante algunos eventos y han sido medidas en laboratorio (Enomoto y Hashimoto, 1990, 1992). En Hayakawa y Molchanov (2002) la hipótesis sobre la emanación de gases calientes debido a un aumento de fluidos bajo el suelo es examinada. En el presente trabajo de investigación se analizó el TEC, calculado utilizando datos GPS, de un rango de días pertenecientes a diversos eventos sísmicos registrados en el estado de Oaxaca durante el período 2008 a 2015 con la finalidad de identificar anomalías ionosféricas relacionadas a eventos sísmicos.

1.1. Planteamiento del problema

Para México y el mundo resultan de importancia los trabajos científicos que aborden el estudio de las anomalías ionosféricas como posibles precursores sísmicos, ya que los terremotos son fenómenos que a la fecha no pueden ser pronosticados. Para el caso de México, su geología refleja que gran parte de su territorio está sometido a enormes esfuerzos que causan grandes terremotos. La principal causa del alto grado de sismicidad en México es el movimiento de las placas tectónicas: Norteamericana, Cocos, Rivera y del Pacífico, mismas que forman parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. Como consecuencia de la intensa actividad entre las placas tectónicas ubicadas en el lado oeste de México las zonas de mayor actividad sísmica en el país se encuentran en los estados, de la costa del Pacífico, de: Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. El alto grado de sismicidad en la costa del Pacífico en México aunado a la escasa aplicación de datos satelitales, recolectados por estaciones GPS alrededor del país, para la búsqueda de anomalías ionosféricas en México hacen que el tratamiento y análisis de estos datos sea indispensable para la detección y estudio de anomalías ionosféricas.

Específicamente, en este trabajo se estudió la región de Oaxaca, comprendida entre los 15.00° y los 18.50° de Latitud Norte y los 94.50° y 98.75° de Longitud Oeste, al ser una de las regiones de más alta actividad sísmica en México. Dicha actividad está asociada al proceso de subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica (Núñez-Cornú y Ponce, 1989). Teniendo en cuenta sus características y peligrosidad, en la región de Oaxaca se pueden distinguir tres tipos principales de temblores de importante magnitud ($m_b \geq 6.5$, $M_s \geq 7.0$) (Núñez-Cornú y Ponce, 1989):

- a) De subducción, asociados directamente al contacto entre las dos placas, con un mecanismo focal de falla inversa de bajo ángulo, con epicentros en la costa y una profundidad entre 15 y 20 kilómetros (Chael y Stewart, 1982; Astiz y Kanamori, 1984).
- b) De falla normal y una profundidad de 65 a 115 kilómetros, que tienen lugar en la placa subducente con epicentros en el interior del continente, al norte de la ciudad de Oaxaca, que se encuentra a una latitud de 17°N (Jiménez, 1977; Jiménez y Ponce, 1979).
- c) De falla normal y una profundidad aproximada de 25 a 40 kilómetros, con epicentros al sur de la ciudad de Oaxaca; de este tipo de eventos, sólo uno ha sido estudiado, el temblor del 15 de enero de 1931, con una magnitud igual a 8.0 (Núñez-Cornú, 1983; Singh et al., 1985).

1.2. Justificación

A pesar de que Oaxaca es un área que presenta alta actividad sísmica se carecen de estudios, dentro del estado del arte, relacionados a la detección y análisis de anomalías ionosféricas como posibles precursores sísmicos en esta área. Los efectos de la actividad previa a un sismo sobre la ionosfera terrestre pueden ser investigados usando la densidad de electrones ionosféricos (Akhoondzadeh y Saradjian, 2011), esta densidad puede ser obtenida utilizando datos satelitales. El presente estudio utiliza datos recolectados por el sistema GPS ya que ofrece diversos beneficios a la hora de conocer el estado eléctrico de la ionosfera. Entre estos beneficios se encuentra que, en comparación con otras técnicas aplicadas a estudios relacionados con anomalías en el contenido eléctrico de la ionosfera como precursores sísmicos, el GPS brinda datos satelitales de forma gratuita y a nivel global. Por ejemplo, una técnica que ha sido aplicada a estudios relacionados con precursores sísmicos es la medición de las concentraciones y/o cambios de gas radón en el suelo o agua subterránea. Sin embargo, para realizar estos estudios es necesario disponer e instalar en el área de estudio equipo especializado (sensores) y brindarle mantenimiento durante el tiempo del estudio. Con la técnica GPS lo anterior no es precisamente necesario, esto debido a la existencia de diversas redes geodésicas alrededor del mundo que realizan el monitoreo continuo de zonas de interés (por ejemplo, el monitoreo de fallas geológicas), generando una cantidad considerable de datos espaciales. Por lo tanto, al permitir, la técnica GPS, el acceso a un historial de datos de distintas áreas y que pueden ser aplicados para los fines del presente trabajo sin la necesidad de acudir al área de estudio y/o disponer de equipo sofisticado, se decidió utilizar datos satelitales GPS.

Como caso de estudio se propone a la región de Oaxaca, esto con base en los siguientes fundamentos. El SSN de México pone a disposición del público un catálogo digital configurable de los sismos registrados, por dicho servicio, en la República Mexicana. Con la finalidad de avalar el área de estudio se realizó una búsqueda en el catálogo del SSN utilizando los parámetros de la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1: Parámetros utilizados en la búsqueda de eventos sísmicos a través del catálogo del SSN.

Magnitud (SSN)	Estados	Período (años)
5.0 a 9.5	Chiapas, Guerrero y Oaxaca	2008 al 2015

Los estados de la **Tabla 1.1** fueron seleccionados por ubicarse en las costas del Océano Pacífico, zona considerada altamente sísmica. Además, se ubicaron las estaciones GPS, pertenecientes a redes geodésicas del UNAVCO, NGS e INEGI, en los estados de interés (Ver **Figura 1.1**).

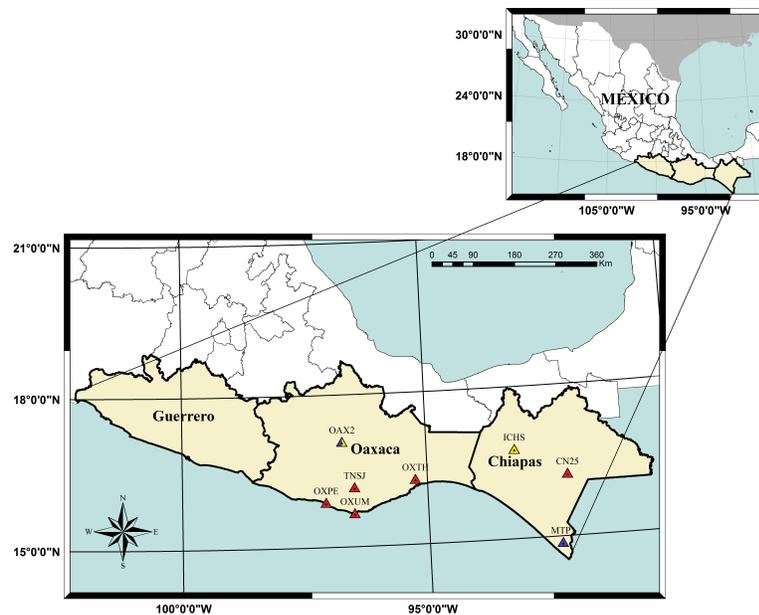


Figura 1.1: Estaciones GPS en los estados de interés. TLALOCNet (UNAVCO) de rojo, CORS (NGS) de azul y RGNA (INEGI) de amarillo.

Tabla 1.2: Eventos sísmicos registrados por el SSN, durante el período 01/01/2008 al 31/12/2015, utilizando los parámetros de la **Tabla 1.1**. Los resultados pueden variar a partir del momento de búsqueda. Fecha de consulta: 21 de marzo de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Chiapas	10	8	9	9	29	13	19	16	113
Guerrero	3	4	2	4	6	12	8	2	41
Oaxaca	2	0	5	3	15	4	9	5	43

Los resultados revelan que Oaxaca es el segundo estado, de entre los seleccionados, donde se han registrado más eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 5.0 ($M \geq 5.0$); con cuarenta y tres eventos desde el 2008 hasta el 2015. Además, resultó de mucha importancia que el estado de Oaxaca dispone de diversas estaciones GPS (Ver **Figura 1.1**) localizadas a lo largo de su costa. De los resultados obtenidos en la **Tabla 1.2** solo se consideraron aquellos de magnitud mayor o igual a 5.1 ($M \geq 5.1$) para este estudio. El porcentaje de eventos que cumplían con la magnitud establecida es el siguiente: 76.10% del estado de Chiapas, 73.17% de Guerrero y un 65.116% de Oaxaca (Ver **Tabla 1.3**).

Tabla 1.3: Eventos sísmicos de magnitud mayor o igual a 5.1 ($M \geq 5.1$).

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Chiapas	8	4	8	6	22	12	11	15	86
Guerrero	3	4	0	4	5	6	6	2	30
Oaxaca	2	0	4	3	10	1	6	2	28

Lo anterior permitirá conocer, por horas y días, el estado y comportamiento del TEC en la ionosfera los días previos, durante y después de diferentes eventos sísmicos registrados en un área en específico, con una determinada magnitud y por un período de tiempo.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Diseñar una metodología de análisis para buscar precursores sísmicos en la componente vertical del TEC en la ionosfera durante eventos sísmicos de magnitud ligera a moderada ($M \geq 5.1$) utilizando datos del sistema GPS.

1.3.2. Específicos

1. Realizar una comparación cuantitativa entre los registros de TEC de un rango de días para los diferentes eventos sísmicos en estudio.
2. Clasificar, con base en su nivel registrado: bajo, ordinario, alto, el comportamiento del TEC de un rango de días en estudio.
3. Identificar si existen anomalías, en forma de incrementos o decrementos, en el TEC registrado para el rango de días definido de cada uno de los eventos sísmicos en estudio.
4. Considerar los registros correspondientes a un índice geomagnético para identificar y descartar valores de TEC afectados por posible actividad solar.
5. Comparar los registros de TEC obtenidos para cada uno de los eventos sísmicos en estudio con un registro perteneciente a un año con baja actividad solar.
6. Exponer las áreas sísmicas para el estado de Oaxaca durante el período de años 2008 a 2015 y de los eventos sísmicos considerados en este estudio.

1.4. Hipótesis

Utilizando datos de la constelación GPS para el cálculo del TEC y considerando el impacto de la actividad solar en la ionosfera, es posible detectar anomalías que sirvan como posibles precursores sísmicos en el TEC registrado en un rango de días pertenecientes a diversos eventos sísmicos ($M \geq 5.1$).

1.5. Antecedentes

Uno de los primeros enfoques que se le dió al concepto de precursor sísmico fue la detección de radón: El radón, elemento químico, es un gas natural radioactivo (ya que al descomponerse emite partículas o rayos) que proviene de la desintegración del uranio 238 (elemento que se encuentra en la mayoría de los tipos de suelo y puede ser encontrado en gran parte de la naturaleza, como en el suelo, el agua, el aire y diferentes tipos de sedimentos). La concentración de radón en el suelo ha sido utilizada de manera experimental para ubicar fallas geológicas cercanas a la superficie, ya que su densidad es generalmente más alta sobre las fallas (Richon et al., 2010). Algunos investigadores han tratado de demostrar que las concentraciones elevadas y/o los cambios rápidos de radón en el suelo o agua subterránea pueden servir como precursores sísmicos (Richon et al., 2003). Actualmente se estudian los alcances de este gas como posible precursor de fenómenos naturales como terremotos y erupciones volcánicas. La hipótesis plantea que la compresión en torno a una falla cercana a romperse podría producir emisiones de gas radón; por tanto, una mayor emisión de radón anticiparía la llegada de un terremoto. Dicha hipótesis fue estudiada durante los años 1970 y 1980. Sin embargo, se encontró que los terremotos ocurrían sin que existieran emisiones de gas radón cerca de las fallas geológicas. Así mismo, se detectaron emisiones de radón sin que fueran seguidas por un terremoto. Como consecuencia de la ausencia de resultados confiables la hipótesis fue rechazada por la mayoría de sismólogos hasta hace algunos años, ya que en un estudio realizado posteriormente se demostró que la concentración de gas radón en las aguas subterráneas aumentó durante varios meses antes del terremoto de 1995 en el Sur de la Prefectura de Hyogo (Kobe) el 17 de enero de 1995 a las 05:47 horas ($M = 7.3$). A partir de finales de octubre de 1994, el comienzo de la observación, hasta finales de diciembre de 1994, la concentración de radón aumentó en torno a cuatro veces. El 08 de enero, nueve días antes del terremoto, la concentración de radón alcanzó un pico de más de diez veces al comienzo de la observación, antes de comenzar a disminuir. Es probable que estos cambios en el radón sean fenómenos precursores del desastroso terremoto (Igarashi et al., 1995). Además, en otro estudio se encontró un aumento en las concentraciones de radón-222 en los gases del suelo provenientes de agujeros poco profundos antes de la ocurrencia de terremotos locales de magnitud moderada (Rastogi et al., 1986, 1987). En Mancini et al. (2015) se investigó la ionización del aire a niveles ionosféricos provocada por la fuga de gases de la corteza terrestre a través del análisis de señales GNSS (Global Navigation Satellite System, por sus siglas en inglés). De forma general, los autores analizaron una serie larga de cinco años (2008 - 2012) de TEC ionosférico basado en GNSS. En determinados terremotos, se ha demostrado que hay una inyección brusca de gas radón hacia la atmósfera, provocada por la aparición de grietas

tectónicas que dejan evacuar el radón con gran intensidad. En 2009, la hipótesis seguía siendo investigada por la NASA (National Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés) como un posible precursor sísmico.

Otro enfoque vinculado con la detección de precursores sísmicos tiene relación con el terremoto de Kobe, mencionado anteriormente. El terremoto de Kobe fue causado por el movimiento de la falla de Nojima en la isla de Awaji. Las bajas oficiales fueron de 6433 personas y más de 40 000 resultaron heridas. Después del terremoto se pidió a la gente de la zona que reportara fenómenos que habían observado antes del terremoto. Su informe, recopilado por diversos medios de comunicación (carta, fax, teléfono e Internet), fue publicado como un libro: “1519 Declaraciones: Precursores del terremoto de Hanshin” (Wadatsumi, 1995). Mismo que contenía ilustraciones y fotografías de rayos sísmicos, lunas rojas y comportamiento inusual de animales y plantas. Las 1519 declaraciones sobre precursores recolectados por Wadatsumi (1995) a través de los medios de comunicación de masas fueron en su mayoría de las áreas circundantes y pueden clasificarse de la siguiente manera:

Tabla 1.4: Clasificación de acuerdo a Ikeya (2004) de las declaraciones sobre precursores sísmicos recolectados por Wadatsumi (1995).

Fenómeno	Declaraciones
Comportamiento animal inusual	872 (51 %)
Cielo y atmósfera	490 (29 %)
Fenómenos marinos y terrestres	189 (11 %)
Aparatos eléctricos	149 (9 %)

La observación de comportamientos inusuales en los animales (Ver **Tabla 1.4**), días antes de que ocurra un terremoto, originó la idea de que el comportamiento de los animales podría servir como precursor sísmico en determinadas áreas. De acuerdo Kirschvink (2000) los animales que viven dentro de regiones sísmicamente activas son sometidos episódicamente a vibraciones intensas. Por lo tanto, una hipótesis señala que el comportamiento “inusual” podría fundamentarse en la percepción, por parte de los animales, de un incremento de señales electromagnéticas de baja frecuencia, lo que permitiría al animal anticipar la ocurrencia de un terremoto y tratar de huir del área. De acuerdo a Kirschvink (2000) aunque informes anecdóticos y retrospectivos de comportamiento animal sugieren que si bien muchos organismos pueden ser capaces de detectar un evento sísmico inminente, no se ha presentado ningún escenario plausible a través del cual se explique la evolución de tales

comportamientos. Además debido al crecimiento social, que exige a su vez, el aumento del desarrollo de infraestructura, la población animal resulta cada vez más aislada, lo que complica la explicación y observación de este comportamiento.

Otro enfoque se relaciona con los electrones defectuosos también conocidos como “agujeros positivos” activados cuando las rocas son sometidas a un estrés cada vez mayor (Freund, 2003). Entonces las nubes de carga de agujeros positivos llegan a la superficie de la Tierra y generan un potencial de tierra positivo (Romanovskaya et al., 2012).

Hoy en día se dedica una especial atención a los precursores sísmicos observados en la ionosfera. Diversas investigaciones han señalado una relación entre el estado de la ionosfera y el acontecimiento de terremotos. Estas investigaciones son el fundamento principal de esta tesis y a continuación se presentan sus puntos más importantes: En un estudio realizado por Zaslavski et al. (1998) se menciona que las perturbaciones ionosféricas debido a actividad geofísica natural, tales como erupciones volcánicas y terremotos, se han estudiado desde el gran terremoto de Alaska en 1964. Estos autores presentan una investigación experimental sobre variaciones en la densidad de electrones en un intervalo de tiempo antes de un terremoto, para ello emplearon datos recolectados directamente de áreas sísmicas activas a través del satélite TOPEX-POSEIDON por un período cercano a tres años y con eventos sísmicos de $M_s > 5$. Entre sus observaciones se encuentran incrementos y decrementos de TEC en el 34 % de los casos estudiados. Además los autores señalan que estas perturbaciones (incrementos y decrementos) son debido a ondas acústicas, al amplificarse a través de la atmósfera por la disminución de la densidad atmosférica con altura creciente. Este estudio indica que es posible utilizar mediciones de TEC para examinar fenómenos sismo-ionosféricos.

Una disminución significativa de TEC fue observada en un estudio realizado por Liu et al. (2001). Dicho estudio examinó el TEC observado por una red de estaciones pertenecientes al GPS en el área de Taiwán, reafirmando que el TEC puede utilizarse para detectar posibles precursores sismo-ionosféricos. En Pulinets y Boyarchuk (2004) se observan variaciones anómalas ionosféricas de uno a quince días antes del fuerte choque sísmico. Mientras que en Hobara y Parrot (2005) estas anomalías fueron observadas un par de días antes y/o después del terremoto y la duración de estas fue de un día, ocurriendo principalmente durante el día. Sus datos pertenecían a sondas ionosféricas terrestres.

A través del análisis de los datos de cinco receptores GPS de la red del INEGI (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática) en México se encontró que el TEC, obtenido a partir de estos datos, muestra anomalías importantes antes del sismo en estudio, razón por la cual Pulinets et al. (2005) establece la existencia de variaciones ionosféricas anómalas asociadas con el proceso de preparación de sismos fuertes ($M > 5$). De forma

similar en Otsuka et al. (2006) se analizaron los datos registrados en dos y tres estaciones GPS en Sumatra y Tailandia, respectivamente, para la investigación de variaciones del TEC, respaldando la idea de Zaslavski et al. (1998) acerca de las ondas acústicas, y argumentando que las ondas acústicas generadas por el terremoto se propagan a la ionosfera a la velocidad del sonido para provocar las variaciones del TEC.

Zhao et al. (2008) observó, a través de variaciones de TEC, un aumento anómalo en el Contenido de Electrones sismo-ionosféricos tres días antes del terremoto de Sichuan del 12 de mayo de 2008. Un análisis de las variaciones del TEC obtenidas mediante el uso de mediciones GPS antes de terremotos fuertes es presentado en Zakharenkova y Shagimuratov (2009). Un punto importante de esta investigación fue la consulta de la actividad geomagnética durante el período de estudio y la breve recopilación de información relacionada a los efectos precursores proporcionados por la ionosfera, tales como: emisiones ópticas registradas en la ionosfera antes de determinados terremotos (Fishkova et al., 1985); el aumento en la concentración de iones ligeros (Bošková et al., 1994) lo que es equivalente a la disminución de la masa iónica media (Pulinets et al., 2003); variaciones en la temperatura de los electrones (Afonin et al., 1999); precipitación de partículas (Galper et al., 1995); formación de irregularidades a gran (Pulinets, 2004; Pulinets y Boyarchuk, 2004) y pequeña escala (Chmyrev et al., 1997) en la densidad electrónica, incluida la penetración anómala del campo eléctrico a través de la plasmasfera en el hemisferio conjugado (Ruzhin y Larkina, 1996).

En Akhoondzadeh y Saradjian (2011) se reitera la importancia de la obtención del TEC a través de mediciones GPS por su contribución considerable al entendimiento de las variaciones sismo-ionosféricas. En este estudio los índices geomagnéticos D_{st} y K_p fueron consultados con la finalidad de evitar perturbaciones naturales elevadas que pueden enmascarar anomalías antes del terremoto. Además, el filtro de Kalman fue aplicado en el proceso de detección de prominentes anomalías del TEC relacionadas con los terremotos.

Durante los períodos de preparación de terremotos se observan a menudo perturbaciones significativas en la densidad de plasma ionosférico. En un estudio realizado por Romanovskaya et al. (2012), estudio que consistió en el análisis de observaciones regulares de GPS para revelar posibles precursores sismo-ionosféricos de terremotos ($M \geq 6$) en el TEC de la ionosfera de uno a ocho días antes del evento, se propone que las anomalías ionosféricas son causadas por la interacción litosfera-ionosfera, particularmente por el campo eléctrico sísmico que penetra desde la superficie del suelo hasta la ionosfera.

Xu et al. (2012) señala que la idea de una posible predicción de terremotos estimula la búsqueda de una correlación entre la actividad sísmica y las anomalías ionosféricas. En su investigación se reportan anomalías ionosféricas dos días antes del terremoto de Chongqing en China ($M = 4.7$) registrado el día 10 de septiembre de 2010 a una profundidad de siete kilómetros. La metodología de su trabajo consistió en el análisis del TEC en la ionosfera a través de datos satelitales por un período de cinco años.

De acuerdo a Akhoondzadeh (2013) las inspecciones visuales o métodos matemáticos simples como la media y la mediana para detectar anomalías sismo-ionosféricas son ampliamente usadas en publicaciones asociadas a los precursores de un terremoto. También hace referencia a que los parámetros ionosféricos se ven afectados por las condiciones geofísicas solares y las tormentas geomagnéticas, considerando en su estudio el índice geomagnético D_{st} .

La actividad ionosférica en las regiones polar, sub-auroral y de latitudes medias se asocia principalmente con tormentas geomagnéticas, eyecciones de masa coronal y agujeros coronales (Cherniak et al., 2014). En las ciencias GNSS, la actividad ionosférica puede ser investigada a través del análisis de fenómenos refractivos que ocurren en la señal de doble frecuencia a lo largo del trayecto desde el satélite al receptor. La identificación de anomalías ionosféricas significativas a escala regional o local también podría verse comprometida por la influencia de efectos globales, como la actividad solar u otros fenómenos geomagnéticos perturbadores (Mancini et al., 2015).

En Zakharenkova et al. (2016) el análisis de la modificación pre-sísmica de la ionosfera se realizó a través de Mapas Ionosféricos Globales (GIM, por sus siglas en inglés) del TEC en el formato IONEX, este artículo encontró que una modificación en la anomalía ecuatorial se produjo días antes de un terremoto, resultando, en días anteriores y durante las horas de la tarde y de la noche, una transformación específica de la distribución del TEC. Además de señalar que el primer paso en las investigaciones de tales efectos es considerar la situación geomagnética.

Aunque estos estudios previos revelaron algunos aspectos de las perturbaciones ionosféricas después de terremotos, no se han observado todos los detalles de las perturbaciones ionosféricas pre sísmicas, incluyendo su inicio cerca del epicentro y su evolución en un área más amplia (Tsugawa et al., 2011). Por último es importante recordar que las anomalías ionosféricas se detectan mejor durante la noche cuando la ionosfera está en calma (Zaslavski et al., 1998).

Capítulo 2

Marco teórico

A continuación se presenta la información que sirvió como fundamento teórico para el desarrollo de la presente tesis. Como primer punto, una descripción general sobre el sistema GPS es presentada. Posteriormente, se describen características importantes de la ionosfera terrestre. Finalmente, teoría relacionada al Contenido Total de Electrones es presentada.

2.1. El Sistema de Posicionamiento Global

El Sistema de Navegación por Satélite de la Marina (NAVSAT, por sus siglas en inglés), también llamado TRANSIT, fue el primer sistema de navegación por satélite en funcionar, motivo por el cual es considerado como predecesor inmediato de los actuales sistemas de posicionamiento. Este sistema fue concebido a finales de la década de 1950 y desarrollado en la década de 1960 por militares de EE. UU., entre las finalidades de este se encontraba la determinación de coordenadas y el tiempo de los buques en el mar, además de aplicaciones militares en tierra. El uso civil de este sistema de satélites fue eventualmente autorizado, utilizándose en todo el mundo tanto para la navegación como para la topografía (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Cabe señalar, sin embargo, que el sistema TRANSIT ya no se encuentra en funcionamiento desde finales de 1996.

El programa NAVSTAR GPS (Navigation System Timing And Ranging - Global Positioning System, por sus siglas en inglés) fue iniciado en diciembre de 1973. Años después, el 22 de febrero de 1978 se lanzó el primer satélite de este sistema, llegando a ser completamente operacional en 1993 con 24 satélites. Es importante mencionar que el programa NAVSTAR GPS fue desarrollado por el ejército estadounidense para superar las deficiencias de los primeros sistemas (Huerta et al., 2005). El equipo auxiliar de cada satélite, entre

otros, consta de paneles solares para alimentación eléctrica y un sistema de propulsión para ajustes de órbita y control de estabilidad (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). El sistema GPS fue concebido, al igual que su antecesor el sistema TRANSIT, con fines militares, su objetivo es determinar coordenadas espaciales de puntos de interés con respecto a un sistema de referencia mundial a cualquier hora del día y en cualquier lugar del planeta, ya sea de forma estática o dinámica. Para obtener las coordenadas espaciales, es decir la posición de los puntos de interés, el sistema se basa en la resolución de un problema geométrico que consiste en medir la distancia a un conjunto mínimo de cuatro satélites con coordenadas conocidas (a través de señales emitidas por los satélites y capturadas por receptores especiales en tierra). Hoy en día, el GPS es un sistema de radionavegación espacial destinado a diversas tareas, propiedad del Gobierno de los Estados Unidos y operado por su Fuerza Aérea con el objetivo de satisfacer las necesidades de defensa nacional, seguridad nacional, comercial, civil y científicas. A su vez, el sistema GPS se compone de tres segmentos: el Segmento Espacial, el Segmento de Control y el Segmento del Usuario explicados detalladamente en la **Sección 2.1.1**.

El sistema GPS proporciona dos niveles de servicio: el primero es el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS, siglas en inglés) que utiliza el código de adquisición aproximada (C/A, por sus siglas en inglés) en la frecuencia L1 y el segundo es el Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS, siglas en inglés) que utiliza el código P(Y) en L1 y L2. El acceso al PPS está restringido a las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos, las agencias federales de EE.UU. y las fuerzas armadas y los gobiernos aliados seleccionados. El SPS está disponible para todos los usuarios de forma continua, en todo el mundo, sin cargos directos por parte del usuario (NASA ¹, 2012).

2.1.1. Componentes del sistema

Segmento espacial

Las funciones básicas del segmento espacial son, a partir de las instrucciones que reciben del segmento de control, proporcionar una referencia de tiempo atómico, generar las señales de radio frecuencia pseudoaleatorias y almacenar y reenviar el mensaje de navegación (Hernández et al., 2005). El segmento espacial está conformado por satélites, que en conjunto forman una constelación (Ver **Figura 2.1**). Sin embargo, debido a que la vida útil de un satélite se acaba por el desgaste de los paneles solares, falta de capacidad de los acumuladores, averías no reversibles en los sistemas electrónicos o agotamiento del combustible de maniobra, se planificó su reemplazo en bloques (Huerta et al., 2005).

¹https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html

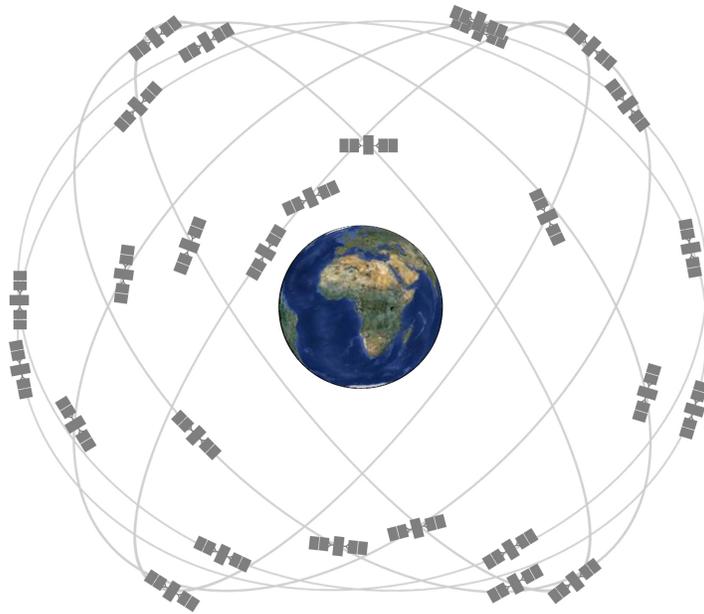


Figura 2.1: Ilustración de los satélites que conforman el Segmento Espacial del sistema NAVSTAR GPS. Fuente: <http://www.gps.gov/>

Una constelación de satélites tiene la finalidad de proporcionar posicionamiento global continuo, por lo cual debe contar con un número suficiente de satélites para asegurar que, al menos, cuatro satélites sean simultáneamente visibles electrónicamente en cada sitio (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Actualmente, la constelación GPS consta de 31 satélites (entre operativos y de reserva) en órbita y el promedio de vida útil de cada satélite es de aproximadamente diez años. En general, las características actuales de la constelación de satélites GPS son las siguientes:

- Constelación compuesta por 31 satélites.
- Inclinación de 55 grados.
- Período de revolución de 12 horas.
- Órbita no geoestacionaria y casi circular.
- Altura aproximada de 20 200 kilómetros.
- Velocidad de los satélites de 3218 km/hora.

En relación a los bloques de satélites, a lo largo de la historia del GPS han existido diferentes clases o tipos de satélites que en conjunto forman bloques. Hasta el momento se han desarrollado diferentes satélites pertenecientes a los Bloques I, II, IIA, IIR, IIR-M, IIF y III.

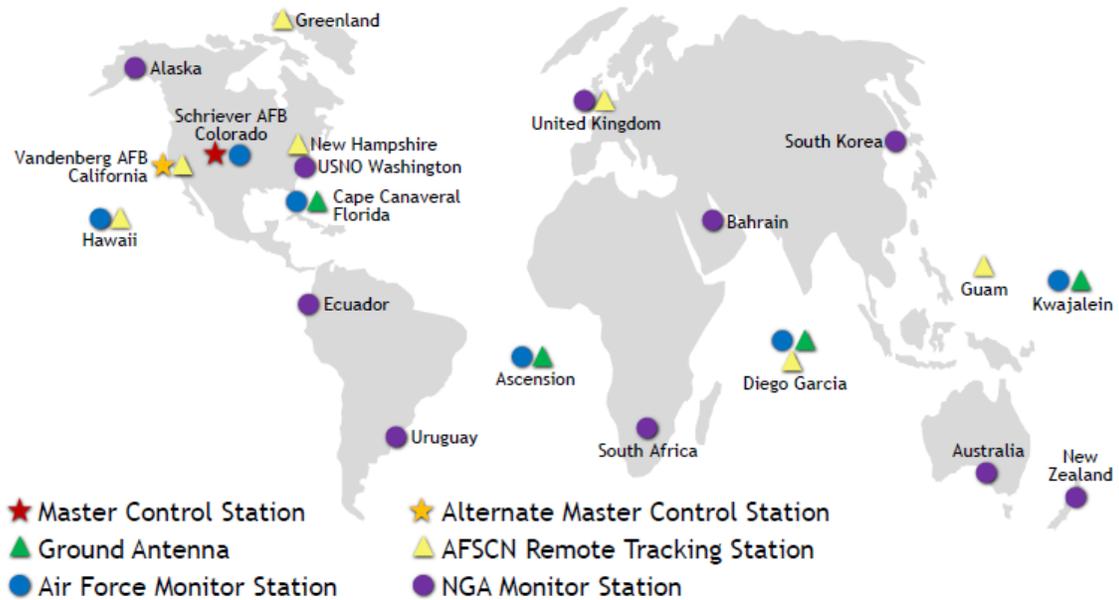
Segmento de control

De forma general el segmento de control GPS consiste en una red global de instalaciones terrestres que rastrea los satélites GPS, monitorea sus transmisiones, realiza análisis y envía comandos y datos a la constelación. Por lo tanto, es responsable de dirigir y mantener en funcionamiento al sistema. Este segmento consiste en una Estación de Control Maestra (MCS, siglas en inglés), una Estación de Control Maestra Alternativa, dieciséis Estaciones de Monitoreo (MS, siglas en inglés) que forman la red de seguimiento y de once antenas de mando y control que son el enlace de comunicación con los satélites (Ver **Figura 2.2**).

Al segmento de control se le denomina internacionalmente con las siglas OCS (del inglés Operational Control Segment) y sus funciones principales son las siguientes:

- El despliegue y mantenimiento del sistema.
- Monitoreo y control permanente de los satélites para la determinación y predicción de parámetros orbitales y del reloj abordo.
- La sincronización de los relojes de los satélites con el tiempo GPS.
- La actualización periódica de los datos del mensaje de navegación de los satélites.
- La supervisión de datos auxiliares.
- El cifrado de datos y protección de servicios contra usuarios no autorizados.

GPS Control Segment



Updated May 2017

Figura 2.2: Ubicación de las instalaciones que integran al OCS. Fuente: <http://www.gps.gov/>

Segmento de usuario

De acuerdo a Hofmann-Wellenhof et al. (2008) el segmento de usuario puede clasificarse en las siguientes categorías: usuarios, tipos de receptores y diversos servicios de información. La primer categoría, de usuario, se subdivide en usuarios militares y civiles, así como usuarios autorizados y no autorizados. Es importante señalar que los usuarios civiles y los no autorizados no tienen acceso a todas las señales o servicios del sistema.

2.1.2. La señal GPS

Los satélites del sistema GPS transmiten la información que generan en dos frecuencias de señales de uso civil, L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.60 MHz), derivadas de una frecuencia fundamental (Ver **Ecuación 2.1**) generada por relojes atómicos con una estabilidad del orden de 10^{-13} (Hernández et al., 2005).

$$f_0 = 10,23 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

De acuerdo a Carrano et al. (2009) un receptor GPS de doble frecuencia puede estimar el TEC a lo largo de la trayectoria de la señal, debido a la naturaleza dispersiva de la ionosfera.

Estructura de la señal

Sobre las frecuencias de señales del GPS (L1 y L2) se modulan los siguientes tipos de códigos PRN (Pseudorange Random Noise, siglas en inglés) y mensajes de navegación:

- Código de Adquisición (C/A (t)), disponible para uso civil y designado como SSP. La secuencia se repite cada milisegundo y su velocidad o chip-rate es de un megabit por segundo (Mbps, sigla en inglés), lo que supone una longitud de onda equivalente de 293.1 metros. Modulada únicamente sobre L1 y omitida intencionadamente de L2, omisión que permite negar la exactitud completa del sistema a los usuarios no militares (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).
- Código de precisión (P (t)), reservado para uso militar y para usuarios civiles autorizados. El código P, designado como PPS tiene una longitud de onda efectiva de aproximadamente 30 metros (velocidad (chip rate) de diez Mbps). Siendo modulado sobre ambas portadoras (L1 y L2). El acceso ilimitado al código P se permitió hasta que el sistema se declaró plenamente operativo. En la actualidad, el código P está codificado en el código Y para ponerlo a disposición de los usuarios autorizados. Además de los códigos PRN, se modula un mensaje de datos que consta de información de estado, sesgo de reloj satelital y efemérides de satélite sobre los portadores (L1 y L2) (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).
- Mensaje de navegación (D (t)), se modula sobre ambas portadoras a 50 bits por segundo e incluye información sobre efemérides, relojes de los satélites, coeficientes del modelo ionosférico e información sobre el estatus de la constelación entre otros (Hernández et al., 2005).

2.1.3. Fuentes de error GPS

La información que viaja en una señal satélital puede ser afectada por las siguientes fuentes de error:

- Efectos atmosféricos (ionosfera, troposfera).
- Efectos relacionados al multirrayecto.
- Errores de efémerides y de reloj.
- Errores debido a la relatividad.
- Errores aleatorios.
- Errores humanos (hardware).
- Disponibilidad Selectiva.

Dos técnicas para negar a los usuarios civiles el uso pleno del sistema GPS han sido implementadas. La primera corresponde a la Disponibilidad Selectiva (SA, siglas en inglés) y la segunda es conocida como Anti-Spoofing (A-S, siglas en inglés) (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Disponibilidad Selectiva (SA)

Durante el diseño del sistema GPS, la precisión esperada del posicionamiento de pseudodistancia del código C/A estaba próxima al rango de unos cuatrocientos metros. Sin embargo, y para sorpresa de los científicos, las pruebas de campo alcanzaron el nivel de precisión de navegación de quince a cuarenta metros para el posicionamiento y una fracción de un metro por segundo para la velocidad. Por lo tanto, el objetivo de la Disponibilidad Selectiva consiste en negar esta precisión de navegación a los adversarios potenciales mediante la deterioración del reloj del satélite y mediante la manipulación de las efemérides (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

La Disponibilidad Selectiva se activó el 25 de marzo de 1990 y de acuerdo con las especificaciones del Departamento de Defensa (DoD, siglas en inglés) la precisión de los receptores autónomos se degradó a 100 metros para la posición horizontal y a 156 metros para la altura, estas especificaciones también implicaron un error de velocidad de 0.3ms^{-1}

y un error en el tiempo de 340 nanosegundos. No obstante, años después, el 2 de mayo de 2000, alrededor de las 4:00 hora universal (UT, siglas en inglés), la Disponibilidad Selectiva fue apagada (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Como consecuencia directa, la precisión de los receptores civiles se incrementó. Sin embargo, a pesar de la desactivación de la SA, en las zonas o momentos que por razones de seguridad militar lo requieran se puede activar la Negación Selectiva (SD, del inglés Selective Denial) de forma focalizada. Esta denegará el acceso a la señal GPS para usuarios no autorizados por interferencias terrestres.

Anti-Engaño (A-S)

Otra fuente de error que degrada la señal GPS es la técnica Anti-Engaño. Esta consiste en la habilidad de “apagar” el código P o invocar un código cifrado como medio para negar el acceso a este a todos los usuarios, excepto, por supuesto, a los autorizados. Esto con la finalidad de evitar que adversarios envíen señales falsas con la firma del GPS para crear confusión y malinterpretaciones entre los usuarios (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Esencialmente, el A-S se logra mediante la encriptación del código P a través de un nuevo código secreto W, al código resultante se le denomina código Y protegido, al cuál solo pueden acceder, en ambas señales portadoras, usuarios autorizados a través de una clave otorgada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Por lo tanto, cuando el A-S está activo, el código P en las portadoras L1 y L2 se sustituye por el código Y protegido. De acuerdo a Hofmann-Wellenhof et al. (2008) la primera vez que se activo el A-S fue durante el fin de semana del 1 de agosto de 1992 a manera de prueba. Posteriormente se implementó de manera permanente el 31 de enero de 1994.

Refracción ionosférica

De acuerdo a Akhoondzadeh (2013), debido a la influencia de la ionosfera en las señales en la banda L, transmitidas por los satélites GPS, esta pasó a ser la mayor fuente de error en la utilización de este sistema, después de la desactivación de la técnica de Disponibilidad Selectiva. Por lo cuál, la refracción ionosférica es detallada a continuación.

De acuerdo con Hofmann-Wellenhof et al. (2008), la serie:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.2)$$

se aproxima al índice de refracción de fase. Los coeficientes c_2, c_3, c_4 no dependen de la frecuencia si no de la cantidad N_e que denota el número de electrones por metro cúbico (ej. la densidad de los electrones) a lo largo de la trayectoria de propagación. Usando una aproximación cortando la expansión de la serie después del término cuadrático, es decir:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2}, \quad (2.3)$$

diferenciando esta ecuación:

$$dn_{ph} = -\frac{2c_2}{f^3} df, \quad (2.4)$$

y sustituyendo las **Ecuaciones (2.3)** y **(2.4)** en $n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df}$ se tiene:

$$n_{gr} = 1 + \frac{c_2}{f^2} - f \frac{2c_2}{f^3} \quad (2.5)$$

o bien:

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.6)$$

Puede verse a partir de la **Ecuación (2.6)** que el grupo y los índices de refracción de fase se desvían de la unidad con signo opuesto. Con una estimación para c_2 (Hofmann-Wellenhof et al., 2008),

$$c_2 = -40,3N_e \quad [Hz^2], \quad (2.7)$$

la relación $n_{gr} > n_{ph}$ y, por lo tanto, $v_{gr} < v_{ph}$ sigue porque la densidad electrónica N_e es siempre positiva. Como consecuencia de las diferentes velocidades, se produce un retardo de grupo y un avance de fase. En otras palabras, los códigos de alcance GNSS se retrasan y las fases portadoras son avanzadas. Por lo tanto, los pseudorangos de los códigos medidos son demasiado largos y los pseudorangos de la fase de la portadora medidos son

demasiado cortos en comparación con el intervalo geométrico entre el satélite y el receptor. La cantidad de la diferencia es la misma en ambos casos.

De acuerdo con el principio de Fermat, el rango medido s es definido por:

$$s = \int n ds \quad (2.8)$$

donde la integral debe extenderse a lo largo de la trayectoria de la señal. El rango geométrico s_0 a lo largo de la línea recta entre el satélite y el receptor puede obtenerse de manera análoga ajustando $n = 1$:

$$s_0 = \int ds_0. \quad (2.9)$$

La diferencia Δ^{Iono} entre el rango medido y el geométrico se llama refracción ionosférica y se sigue de:

$$\Delta^{Iono} = \int n ds - \int ds_0, \quad (2.10)$$

la cual puede escribirse para un índice de refracción de fase n_{ph} de la **Ecuación (2.3)** como:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = \int (1 + \frac{c_2}{f^2}) ds - \int ds_0 \quad (2.11)$$

y para un índice de refracción de grupo n_{gr} de la **Ecuación (2.6)** como:

$$\Delta_{gr}^{Iono} = \int (1 - \frac{c_2}{f^2}) ds - \int ds_0. \quad (2.12)$$

Una simplificación es obtenida al aproximar la integración para el primer término en las **Ecuaciones (2.11)** y **(2.12)** a lo largo del rango geométrico. En este caso, ds se convierte en ds_0 y las fórmulas:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = \int \frac{c_2}{f^2} ds_0, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = - \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \quad (2.13)$$

se obtienen, las cuales también pueden ser escritas como:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = -\frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0, \quad (2.14)$$

donde la **Ecuación (2.7)** ha sido sustituida. Definiendo el Contenido Total de Electrones (TEC) por:

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2.15)$$

y sustituyendo TEC en la **Ecuación (2.14)** se tiene:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (2.16)$$

como el resultado final (en metros). Usualmente, el TEC esta dado en unidades de TEC (TECU, siglas en inglés), donde:

$$1 TECU = 10^{16} \text{ electrones} \times m^2. \quad (2.17)$$

Obsérvese que el TEC introducido en la **Ecuación (2.15)** es el Contenido Total de Electrones a lo largo de la trayectoria del camino de la señal recta entre el satélite y el receptor. Se asume que la integral incluye los electrones en una columna con una sección transversal de $1m^2$ que se extiende desde el receptor hasta el satélite. Usualmente, el Contenido Total de Electrones Vertical (VTEC) es modelado (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). En un supuesto, esta cantidad se indica a veces como la sobrecarga total del contenido de electrones. Si el VTEC se introduce en la **Ecuación (2.16)**, las cantidades aplican sólo para los satélites en el cenit. Para las líneas de visión arbitrarias (Ver **Figura 2.3**), el ángulo cenital del satélite debe tenerse en cuenta por:

$$\Delta_{ph}^{Iono} = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC, \quad \Delta_{gr}^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (2.18)$$

desde que la longitud de la trayectoria en la ionosfera varía con un ángulo de cenit cambiante. Estas dos cantidades difieren solamente con respecto al signo. Introduciendo la notación:

$$\Delta^{Iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (2.19)$$

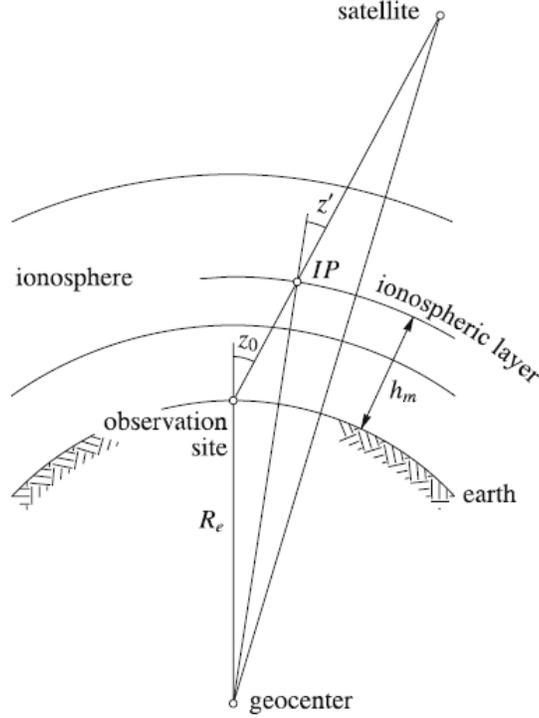


Figura 2.3: Geometría para el retardo de la trayectoria ionosférica (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

para la cantidad positiva de la influencia ionosférica en un pseudorango medido permite la omisión de los subíndices ph o gr pero requiere la consideración del signo correcto para los modelos apropiados. Esto significa que la influencia ionosférica para el pseudorango de código es modelada por $+\Delta^{Iono}$ y para el pseudorango de fase por $-\Delta^{Iono}$.

La **Figura 2.3** representa un modelo de capa única con la suposición de que todos los electrones libres se concentran en una cáscara esférica infinitesimalmente delgada a la altura h_m y conteniendo el punto ionosférico IP . Donde la relación:

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + h_m} \sin z_0 \quad (2.20)$$

es derivada, donde R_e es el radio medio de la Tierra, h_m es un valor medio para la altura de la ionosfera, y z' y z_0 son los ángulos cenitales en el punto ionosférico y en el sitio de observación. El ángulo cenital z_0 puede calcularse para una posición de satélite

conocida y para las coordenadas aproximadas del sitio de observación. Para h_m un valor en el rango de 300 y 400 kilómetros es típico. La altura es sólo sensible para elevaciones de satélite bajas. Como se mostró en la **Ecuación (2.16)**, el cambio de rango causado por la refracción ionosférica puede limitarse a la determinación del TEC. Sin embargo, el propio TEC es una cantidad bastante complicada (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

2.2. La ionosfera terrestre

La ionosfera es considerada como la cuarta capa de la atmósfera superior de la Tierra (Ver **Figura 2.4**). En esta zona la cantidad de electrones e iones que interactúan eficazmente con los campos electromagnéticos son abundantes. Como medio conductor, desempeña un papel importante en el Circuito Eléctrico Global, y como gas parcialmente ionizado, se somete a las leyes de la física del plasma. Debido a sus propiedades electromagnéticas, el plasma ionosférico interactúa con el Campo Magnético Terrestre y, en gran medida, es controlado por él. Por lo tanto, nos referimos a la ionosfera como un plasma magnetoactivo (Pulinets y Boyarchuk, 2004). La ionización presente en esta región de la atmósfera es producida principalmente por radiación ultravioleta y rayos X solares (Ezquer y Radicella, 2008). Sin embargo, existen otras fuentes que pueden producir la ionización, como son los rayos cósmicos provenientes del sol, así como partículas energéticas que se precipitan en las regiones altas del planeta, mismos que tienen un carácter esporádico relacionado con la actividad solar (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

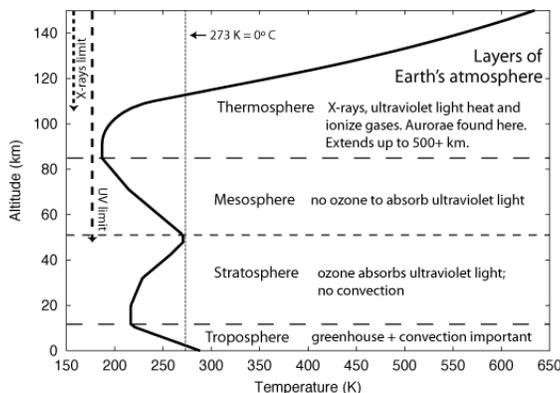


Figura 2.4: Capas inferiores de la atmósfera de la Tierra (Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration and United States Air Force, 1976).

La ionosfera terrestre ha sido estudiada durante décadas utilizando técnicas de observación que hoy son consideradas convencionales (Ver **Tabla 2.1**), principalmente sondeos efectuados con instrumentos localizados sobre la superficie de la Tierra, a bordo de globos, cohetes y satélites artificiales (Palacios et al., 2006).

Tabla 2.1: Ejemplos de técnicas para monitorear la ionosfera.

Intrumento	Descripción	Origen	Función	Producto
Ionosonda.	Radar especial para la examinación de la ionosfera.	Inventado en 1925 por Gregory Breit y Merle A. Tuve.	Emite verticalmente un impulso de radio para posteriormente registrar el tiempo que tarda en recibirse la señal reflejada en un receptor, obteniendo la densidad de electrones.	Ionograma.
Teoría de dispersión incoherente.	Técnica basada en tierra para el estudio de la ionosfera.	Propuesta por el profesor William E. Gordon en 1958.	La medición y temperatura de la densidad de electrones y iones, así como su composición y la velocidad del plasma.	Datos ionosféricos.
Receptor GPS.	Dispositivo electrónico multi frecuencia.	EE. UU.	Posicionamiento y recolección de datos atmosféricos, entre otros.	Contenido Total de Electrones a una escala global.
Misión GPS/MET.	Probar la técnica de ocultación de radio GPS.	3 de abril de 1995 a marzo de 1997 en EE. UU.	Estimar la fluctuación del TEC a lo largo del camino de la señal GPS al receptor en tierra.	Conjuntos de datos atmosféricos.
Tomografía Ionosférica Computarizada.	Método para mapear la ionosfera.	No Disponible.	Utilizar un arreglo de transmisores satelitales y de receptores en tierra firme con la finalidad de construir una malla virtual que obtendrá lecturas del TEC.	Lecturas del TEC en un período de tiempo considerable.

Como se mencionó en la **Sección 2.1.3**, el retardo ionosférico es la fuente de error más grande para las señales de navegación por satélite, motivo por el cuál la ionosfera juega un papel importante en las aplicaciones GNSS, ya que influye directamente en la propagación de ondas de radio. Sin embargo, debido a que la ionosfera, a diferencia de la troposfera, es un medio dispersivo, la comunidad científica es capaz de evaluar el efecto ionosférico utilizando receptores de doble frecuencia, esto a través de la medición de las modulaciones sobre las fases portadoras y los códigos de fase (Liu et al., 2001; Akhoondzadeh y Saradjian, 2011; Cherniak et al., 2014).

2.2.1. Estructura de la ionosfera

La mayor parte de la ionosfera es eléctricamente neutra. Sin embargo, cuando sus constituyentes químicos son sometidos a la radiación solar ultravioleta con una longitud de onda inferior a los 102.7 nanómetros, que es la principal causa de ionización en esta capa de la atmósfera, los electrones son desalojados de los átomos y las moléculas para producir el plasma ionosférico (Pulinets y Boyarchuk, 2004; Anderson y Fuller-Rowel, 1999). El hecho de que la ionosfera este compuesta por partículas de iones hace posible que al transmitir una señal electromagnética hacia ella, la señal sea reflejada o desviada de nuevo hacia la superficie terrestre. Esta propagación de señales hace posible la comunicación a distancias continentales. Además, la ionosfera se comporta como una interfase entre dos sistemas muy diferentes, el ambiente habitable y el ambiente espacial (Palacios et al., 2006).

A lo largo de los años, diversos autores han establecido de forma distinta la altitud de la ionosfera (Ver **Tabla 2.2**). Sin embargo, la misma puede ser resumida en un rango que va desde los 50 hasta los 1000 kilómetros donde el pico de concentración de electrones va desde los 200 hasta los 400 kilómetros.

Tabla 2.2: Altitudes de la ionosfera de acuerdo a diversos autores. N/D equivale a No Disponible.

Altitud (km)	Pico de concentración de electrones	Autor
70 a 1000	≈ 200-400 km	Carrano et al. (2009)
A partir de los 80	N/D	Palacios et al. (2006)
50 a 1000	250-400 km	Pulinets y Boyarchuk (2004)
60 a 3000	≈ 300 km	Schunk y Nagy (2000)

Al principio, los diferentes sondeos de radio de la ionosfera parecían indicar que esta se formaba en capas distintas. Sin embargo, hoy se conoce que este no es el caso y que en realidad son diferentes regiones (Ver **Figura 2.5**). Mientras que el término capa se refiere a la ionización que sucede dentro de una región (Anderson y Fuller-Rowel, 1999). Estas regiones se denominan D, E y F (Schunk y Nagy, 2000) y su nombre es atribuido al científico Sir Edward Victor Appleton, quien afirmó que en sus primeros trabajos escribió E por el campo eléctrico reflejado de la primera capa que él reconoció. Más tarde, cuando reconoció una segunda capa en altitudes más altas, escribió F por el campo reflejado. Posteriormente, conjeturó que puede haber otra capa a altitudes más bajas, por lo que decidió nombrar a las dos primeras capas E y F y a la posible inferior D, permitiendo así la designación alfabética de otras capas no descubiertas (Schunk y Nagy, 2000).

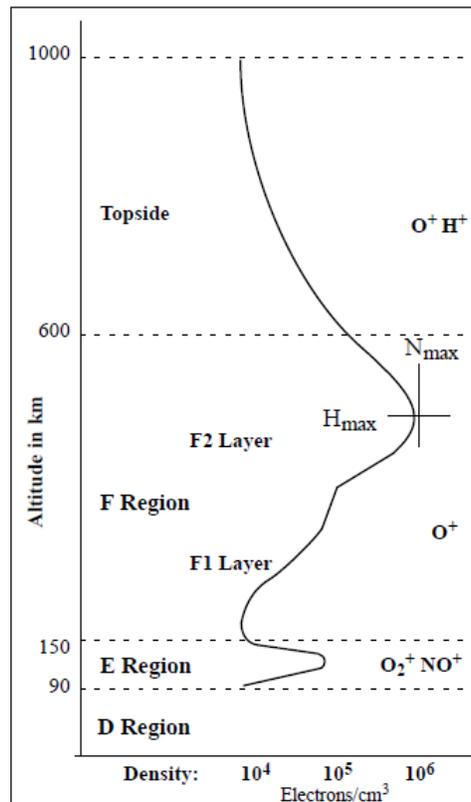


Figura 2.5: Ilustración de las diferentes regiones de la ionosfera y sus poblaciones de iones predominantes en sus respectivas alturas sobre el suelo. Se observa como la densidad en la ionosfera varía considerablemente. Fuente: Anderson y Fuller-Rowel (1999).

Región D

La altura conocida de la cúspide de la región D en la ionosfera es de 90 kilómetros (Ver **Figura 2.5**). Sin embargo, durante los períodos de actividad solar intensa esta puede bajar a los 50 kilómetros. Los niveles de densidad electrónica de esta región varían conforme a la altitud y a la hora del día, los valores para el mediodía son: a los 40 kilómetros su densidad es de aproximadamente 10 e/cm^3 , a los 60 km es de 100 e/cm^3 , a los 80 km de 1000 e/cm^3 y aproximadamente $15\,000 \text{ e/cm}^3$ a los 90 km de altitud. Por el contrario, en la noche la densidad electrónica cae: 10 e/cm^3 a los 85 km, 100 e/cm^3 a los 88 km y 1000 e/cm^3 a los 95 km, para posteriormente permanecer con valores similares hasta al menos 140 km de altitud. Además, al ser esta región la más cercana a la tierra, la densidad de electrones libres es menor que en las demás regiones (Ezquer y Radicella, 2008).

La región D está caracterizada por la composición iónica más compleja (Pulinets y Boyarchuk, 2004). Contiene los grupos más grandes de iones, tales como $H^+(H_2O)_n$, $NO^+(H_2O)_n$, $NO^+(CO_2)_n$, etcétera. Es la única región de la ionosfera donde la concentración de los iones positivos no es igual a la concentración de electrones, esto debido a la formación de iones negativos. A altitudes inferiores a 75 km la concentración de iones negativos prevalece sobre la concentración de electrones. Debido a la extinción de la reacción NO en invierno la concentración de electrones crece, es por esto que la densidad electrónica es más alta en la región D durante el invierno que en el verano para los mismos ángulos del cenit solar. Las variaciones diurnas de la concentración de electrones en la región D (diferencia entre los valores del mediodía y los de medianoche) pueden alcanzar 1.5 órdenes de magnitud para la actividad solar baja y 2.5 órdenes para los períodos de alta actividad solar. En relación con las regiones atmosféricas, las alturas de la región D corresponden a la mesosfera, donde se observa una inversión de temperatura de 260 Kelvin a 180 K a alturas correspondientes de 50 a 85 kilómetros, posteriormente la temperatura aumenta constantemente (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Región E

Esta región de la ionosfera se encuentra entre los 90 y los 150 kilómetros de altitud (Ezquer y Radicella, 2008). Dentro de la región E está la capa E normal, producida por la radiación solar, y capas esporádicas, designadas Es (Ver **Tabla 2.3**) (Anderson y Fuller-Rowel, 1999).

Como se mencionó en el párrafo anterior, la región E de la ionosfera se formó bajo la acción de la radiación solar ultravioleta. Específicamente dentro de la banda de $80 < \lambda < 102.8$ nm. Los principales componentes ionizados son O_2 y N_2 y los iones principales O_2^+ y NO^+ ,

que se forman a partir de O_2^+ y N_2^+ como resultado de reacciones iónico-moleculares. El principal mecanismo de la pérdida de partículas cargadas es la recombinación disociativa de los de los electrones con los iones moleculares (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Durante el día el comportamiento de la región E es muy regular y controlado por el ángulo cenital del Sol. Además, puede ser correctamente descrito dentro de los marcos de aproximación fotoquímica sobre la base de la formación y pérdida de los iones moleculares sin tomar en cuenta su transporte. Mientras tanto, durante el atardecer y la noche el comportamiento de la región E es más complejo, las fuentes de ionización podrían ser dispersadas por la geocorona, que es la parte luminosa de la exosfera, o por la radiación solar en líneas de hidrógeno 121.6 nm, 102.6 nm y helio 58.4 nm y el ion de helio 30.4 nm (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Dentro de la región E podrían formarse capas muy finas. Esta formación se denomina capa E esporádica y se designa como E_S . La formación de estas capas es debido a la convergencia del flujo vertical de iones metálicos de larga vida. Experimentalmente fueron registrados los siguientes tipos de iones: $Na^+(23^+)$, $Mg^+(24^+)$, $Mg^+(26^+)$, $Mg^+(27^+)$, $Al^+(27^+)$, $Si^+(29^+)$, $K^+(39^+)$, $Ca^+(40^+)$, $K^+(41^+)$, $Ca^+(44^+)$, $Ti^+(48^+)$, $Fe^+(54^+)$, $Mn^+(55^+)$, $Fe^+(56^+)$, $Fe^+(57^+)$, $Fe^+(58^+)$, $Ni^+(58^+)$, $Co^+(59^+)$, $Ni^+(60^+)$, $Ni^+(61^+)$, $Ni^+(62^+)$, $Ni^+(64^+)$, $Xn^+(66^+)$, óxidos e hidratos de iones metálicos como: AlO^+ , SiO^+ , MgO^+ , $SiOH^+$, $Na^+(H_2O)$, $Na^+(H_2O_2)$, NaO^+ , $NaOH^+$, se cree que el origen de estos iones es de tipo meteorológico. Para la formación de la capa E esporádica (E_S) los procesos de transporte iónico son muy importantes, ya que estos están conectados con vientos, mareas, ondas gravitatorias y campos eléctricos (Pulinets y Boyarchuk, 2004). Es importante mencionar que la densidad electrónica de la capa E_S puede ser muy alta.

Región F

Esta región de la ionosfera engloba una altitud que va desde los 120 a los 150 kilómetros. La densidad de electrones en esta región es mayor que en el resto debido a que se presentan aumentos de ionización a ambos lados del ecuador magnético, producidos por la existencia de campos magnéticos y eléctricos en la ionosfera ecuatorial (Ezquer y Radicella, 2008).

La región F de la ionosfera esta compuesta por dos capas: F1 y F2. La capa F1 aparece como un punto de flexión en el perfil vertical de la concentración de electrones entre las capas E y F2 a una altura de 160 - 200 km. Rara vez se desarrolla en el máximo distinto, apareciendo más a menudo cerca de los 180 km. La formación de esta región se debe a la radiación ultravioleta solar dentro de la banda $10 < \lambda < 90$ nm y sus principales componentes ionizados son N_2 y O , y en menor medida O_2 . Los iones predominantes que

aparecen como resultado de las reacciones moleculares iónicas son los mismos que en la región E, por ejemplo NO^+ y O_2^+ . Los procesos en ambas regiones son muy similares. En la región F, las reacciones fotoquímicas prevalecen sobre los procesos de transporte, al menos durante el día. La nueva característica que aparece a las altitudes de la capa F1 es la anisotropía de la temperatura del ion de electrones - diferencia entre las temperaturas del electrón y del ion. La probabilidad de aparición de las capas de la región F varía, durante las condiciones diurnas de verano la capa F1 es más probable, ya que se desvanece por la noche, mientras que durante la noche lo es la cavidad entre las capas E y F2, llamada El Valle (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Capa F2

Esta capa es la más densa y dinámica de la ionosfera. Incluye la pequeña parte de la ionosfera inferior desde los 200 km hasta la densidad máxima y toda la ionosfera superior desde el pico hasta 1000 o 2000 km. Esta capa determina la propagación de las ondas decimétricas y realiza la principal contribución en todos los errores (retardo, distorsión de fase, centelleos) de sistemas de navegación tales como GPS y GLONASS (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Esta capa es la más simple en lo que respecta a la consideración fotoquímica pero la más compleja en comportamiento dinámico y termodinámico. Se forma bajo la acción de la misma banda de las emisiones solares, como en la capa F1, por ejemplo $10 < \lambda < 90$ nm. Las principales especies ionizadas en esta capa son el oxígeno atómico, sin embargo, N_2 y O_2 también juegan papeles importantes en el proceso del intercambio del átomo-ion que conduce a la pérdida de electrones por la recombinación disociativa. El ión predominante en la capa F2 es el O^+ y sólo a altitudes superiores a los 700 km los iones ligeros He^+ y H^+ comienzan a exceder la concentración de O^+ . La diferencia principal entre la capa F2 y las otras capas ionosféricas es que la velocidad de pérdida de ionización es proporcional a la concentración de iones cuando en otras capas esto es proporcional al cuadrado de la concentración. Finalmente, esta capa se forma durante el día, y durante la noche disminuye rápidamente, sin embargo, la densidad del plasma es soportada por la difusión ambipolar que conserva la forma y la altura máxima del pico, pero con densidad disminuida (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Tabla 2.3: Regiones y capas de la ionosfera de acuerdo a Pulinets y Boyarchuk (2004).

Región	Rango aproximado de altura (km)	Capa	Rango aproximado de altura (km)	Densidad aproximada de electrones durante el día (m^{-3})
C			65	10^8
D	50-90			
		D	70-90	10^9
		E1	100-110	10^{11}
E	90-140	E2	115	10^{11}
		E_s	110-120	Varía
		F1, $F1\frac{1}{2}$	140-200	2×10^{11}
F	140-350	F2	200-350	10^{12}
Lado superior (topside)	350-1000			$10^{10} - 10^{11}$
Plasmas-fera	> 1000			10^9

2.2.2. Perturbaciones ionosféricas

En la atmósfera terrestre existen distintos tipos de ondas atmosféricas con diferentes escalas espaciales y temporales. Es mencionado en Otsuka et al. (2006) que muchas de estas ondas se generan en la atmósfera inferior para posteriormente propagarse hacia la atmósfera media y superior, y que algunas de estas ondas alcanzan la ionosfera causando perturbaciones en la densidad de electrones ionosféricos. Sin embargo, no se entiende claramente cómo las ondas se propagan hasta la ionosfera.

Las perturbaciones en la ionosfera se producen, en parte, debido a que esta varía de acuerdo a la emisión de radiación electromagnética solar. Estas perturbaciones generan efectos importantes sobre la propagación de ondas de radio y pueden ser divididas en dos tipos: regulares e irregulares. Las perturbaciones regulares son aquellas que suceden debido al ciclo solar y el movimiento de la Tierra. Su clasificación sigue el siguiente orden (Zolesi y Cander, 2014; Anderson y Fuller-Rowel, 1999):

- El ciclo de actividad solar se produce aproximadamente cada once años y engloba la aparición y desaparición de las manchas solares en la superficie del Sol. Por consiguiente, la radiación solar cambia a lo largo del ciclo solar provocando variaciones en el nivel de ionización de la ionosfera.
- Rotación de la Tierra sobre su eje provoca que la densidad electrónica varíe conforme a la hora local y la altitud. En las primeras horas del día la densidad electrónica aumenta a causa de la fotoionización, posteriormente se reduce al atardecer por la ausencia de fuentes de ionización.
- Las estaciones del año son el resultado de la rotación de la Tierra alrededor del Sol. Para los valores del mediodía el claro efecto estacional se expresa en los máximos alrededor de los equinoccios, y el mínimo en el verano. Sin embargo, la amplitud del efecto estacional se reduce con la disminución de la actividad solar (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

Las perturbaciones irregulares son aquellas que se presentan aleatoriamente tanto en el Sol como en la Tierra, por lo cual no pueden predecirse. Entre las más importantes se encuentran:

- Efectos producidos por la Tierra : mareas atmosféricas y ondas de gravedad. Estos fenómenos producen cambios en la concentración electrónica de la ionosfera.
- Perturbaciones asociadas con las erupciones solares y con el ciclo de rotación del Sol, produciendo variaciones en la densidad de electrones de la ionosfera.
- Actividades relacionadas a meteoritos y tormentas e incluso con rayos gama provenientes del exterior del Sistema Solar (afectando principalmente la densidad de electrones de la capa E de la ionosfera).

2.2.3. Actividad solar y sus efectos en la ionosfera

La actividad solar es el fenómeno que más afecta a la ionosfera terrestre (Palacios et al., 2006). La ionosfera “siente” la actividad solar en forma de emisiones ópticas y electromagnéticas y en la forma de cambios severos de convección de plasma en la magnetosfera después del encuentro de esta con los flujos de partículas energéticas que carga el viento solar perturbado, el cambio del campo magnético solar y a corrientes del plasma térmico (Pulinets y Boyarchuk, 2004). Además de una constante radiación emitida por el Sol, sin previa advertencia la atmósfera solar puede ser sacudida por una enorme cantidad de energía (Palacios et al., 2006).

Por lo tanto la dinámica y el comportamiento de la ionosfera se encuentran unidos a los cambios que ocurren en el Sol. Las regiones de ionización que integran a la ionosfera deben su origen a la radiación solar, al campo magnético de la Tierra y al hecho de que la alta actividad de manchas solares está relacionada al aumento de las explosiones solares (la emisión de gran cantidad de energía electromagnética del Sol) y al aumento global de la radiación electromagnética solar. En general los procesos naturales del Sol liberan energía que altera el comportamiento de la ionosfera (Rodrigues y Camargo, 2007).

Tormentas magnéticas

La ionosfera está principalmente bajo el control del viento solar y sufre los efectos de la alta actividad geomagnética. Por lo tanto, una perturbación procedente de la superficie de la Tierra o inducida en la ionosfera inferior no es fácil de detectar y caracterizar (Hobara y Parrot, 2005). La fuente principal de las tormentas magnéticas son graves irregularidades en el viento solar. Independientemente de sus orígenes (eyecciones de masa solar, eventos protónicos, bengalas solares, etc.) su producto final, en las proximidades de la magnetosfera de la Tierra, son fuertes cambios en el campo magnético interplanetario que interactúa con la magnetosfera. En consecuencia, las tormentas magnéticas afectan el estado de la ionosfera.

De acuerdo a Gonzalez et al. (1994), una tormenta geomagnética es un “*intervalo de tiempo cuando un campo eléctrico de convección interplanetaria suficientemente intenso y duradero conduce, mediante una energización sustancial en el sistema magnetosfera-ionosfera, a un corriente de anillo intensificada lo suficientemente fuerte para exceder algún umbral clave de la cuantificación del tiempo de tormenta índice D_{st}* ”.

El índice D_{st} es una medida cuantitativa de la corriente del anillo que se forma alrededor de la Tierra durante una tormenta geomagnética, respaldado por iones con energías de

varías decenas de kiloelectronvoltios (keV) y electrones con una energía cercana a los diez keV (Pulinets y Boyarchuk, 2004). Es comúnmente aceptado que una tormenta magnética es desencadenada por el gran campo eléctrico del amanecer al anochecer producido por el giro hacia el sur del campo magnético interplanetario B_z . La red de los magnetómetros de referencia, igualmente distribuidos a lo largo de la longitud dentro de la banda latitudinal $21^\circ - 33^\circ$, da la contribución cuantitativa para calcular el índice D_{st} . Es comúnmente acordado que una tormenta geomagnética puede desarrollarse cuando el índice D_{st} supera el umbral -50 nanoTeslas (nT) (el cuál corresponde al componente interplanetario B_z -5 nT) y se mantiene por encima de este umbral por lo menos dos horas. Existen otros índices para describir la actividad geomagnética (K_p , A_p , a_p , etc.). Sin embargo, todos ellos tienen una contribución de la actividad de latitudes altas y pueden mostrar el incremento sin el desarrollo de una tormenta magnética, también llamadas sub-tormentas. Los efectos ionosféricos de una tormenta magnética son un fenómeno muy complejo de mayor disipación de la energía del viento solar, probablemente uno de los más complejos en la física ionosférica ya que implica una gran cantidad de cambios en la composición iónica, cambios sustanciales en la temperatura y concentración del plasma, etc. Prácticamente todos los parámetros ionosféricos son afectados por una tormenta magnética (Pulinets y Boyarchuk, 2004).

2.3. Contenido Total de Electrones

La magnitud del error sistemático debido a la refracción ionosférica es directamente proporcional a una de las magnitudes físicas de la ionosfera más interesantes, el TEC, en otras palabras, al número de electrones libres presentes en una columna de sección unidad que se extiende desde una estación receptora en tierra hasta el satélite considerado. Si la columna es vertical, se denomina Contenido Electrónico Total Vertical (VTEC) (Ver **Figura 2.6**), si se considera una columna oblicua se tiene el Contenido Electrónico Oblicuo (STEC, por sus siglas en inglés) (Ver **Figura 2.7**). Si el valor del TEC fuese constante o tuviese una variación regular, los efectos causados por la ionosfera serían de fácil determinación. Sin embargo, el problema principal es que el TEC varía en el tiempo y espacio, en razón del flujo de ionización solar, actividad magnética, ciclo de manchas solares, estación del año, hora del día, localización geográfica y dirección del rayo vectorial del satélite, resultando difícil de corregir (Camargo, 1999; Ezquer y Radicella, 2008).

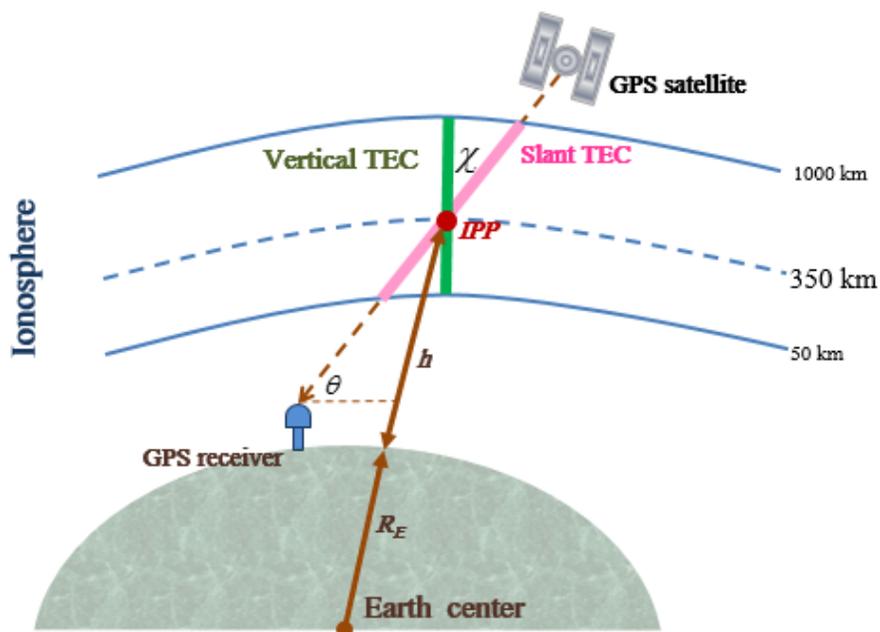


Figura 2.6: Ilustración de la densidad de electrones en una trayectoria vertical (VTEC).
 Fuente: <http://iono-gnss.kmitl.ac.th>.

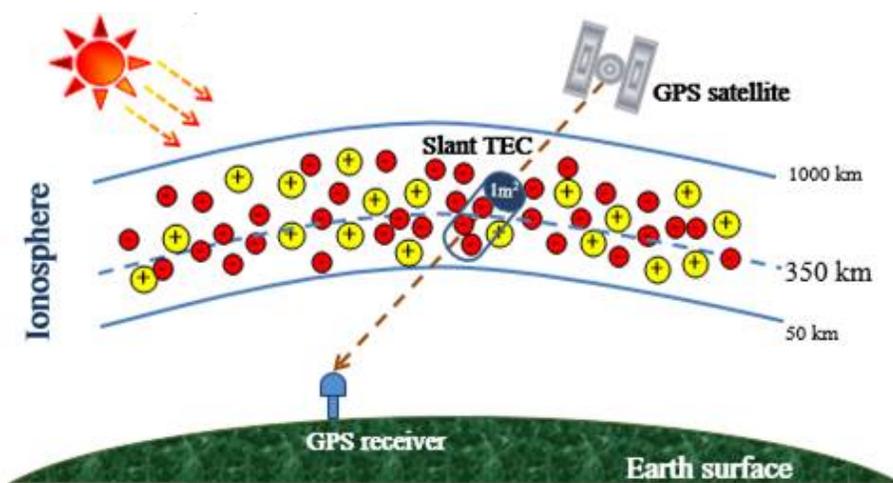


Figura 2.7: Ilustración del TEC Inclinado de un satélite a un receptor. Fuente:
<http://iono-gnss.kmitl.ac.th>.

Las mediciones del TEC se realizan por diferentes medios (Ver **Tabla 2.1**) tales como ionosondas terrestres y mediciones GPS. Estas mediciones favorecen el monitoreo de las perturbaciones ionosféricas que se consideran precursores sísmicos de corto plazo (Akhoondzadeh y Saradjian, 2011). Recientemente, la ampliación de la red de receptores GPS ha generado una cantidad creciente de datos con respecto al estado de la ionosfera y de acuerdo a Zakharenkova et al. (2016) las mediciones GPS TEC proporcionan muchas más ventajas para las investigaciones a escala global en comparación con los datos de ionosondas terrestres o satélites especializados.

Los valores para el TEC suelen variar entre 10^{16} y 10^{19} e/m^2 , dependiendo de la hora del día, la estación de año, la actividad solar, la actividad magnética, la altitud geomagnética, etc. (Sardón et al., 1993). Sus valores mínimos se producen en la media noche, una posible causa de esto es la ausencia del Sol (Ver **Sección 2.2.3**), y sus valores máximos se producen en la media tarde. Finalmente, por la noche el TEC disminuye lentamente debido a la recombinación de los electrones y de los iones.

De acuerdo a Sardón et al. (1993) el Contenido Total de Electrones es definido por:

$$TEC = \int_B^A N dh \quad (2.21)$$

Donde, N es la densidad electrónica (en e/m^3), dh es el incremento en altura (en metros) y la integral se calcula a lo largo del camino que une los puntos A y B (A representaría la ubicación del satélite y B la ubicación del receptor) (Sardón et al., 1993).

El TEC esta relacionado con diferentes fenómenos que afectan su comportamiento (Ver **Sección 2.2.2**). Estos se pueden clasificar, con base en la probabilidad de su constancia, en dos categorías: poco predecibles y menos predecibles (Ver **Tabla 2.4**).

Tabla 2.4: Fenómenos vinculados con el estado del Contenido Total de Electrones.

Poco predecibles	Menos predecibles
Hora local	Anomalía ecuatorial
Latitud	Búrbujas ionosféricas
Época del año	Tormentas ionosféricas
Actividad solar	Perturbación ionosférica viajera (TID, por sus siglas en inglés)
Actividad geomagnética	Perturbaciones ionosféricas repetitivas (SID, por sus siglas en inglés)

La ionosfera produce varios efectos en las señales de radio que la atraviesan (Ver **Tabla 2.5**), siendo la mayoría de ellos proporcionales al Contenido Electrónico Total. Por lo tanto, el TEC es una magnitud ionosférica de interés para los sistemas que usan señales transionosféricas (Ezquer y Radicella, 2008).

Tabla 2.5: Retardos ionosféricos en el cénit para valores máximos (diurnos) y mínimos (nocturnos) del TEC para distintas frecuencias. Fuente: Sardón et al. (1993).

Frecuencia	TEC diurno ($10^{18} e/m^2$)	TEC nocturno ($10^{16} e/m^2$)
100 MHz	4030 m	40.3 m
1227.6 MHz	26.7 m	26.7 cm
1575.42 MHz	16.2 m	16.2 cm
10 GHz	40 cm	4 mm
100 GHz	4 mm	0.04 mm

Dado que el retardo ionosférico es directamente proporcional al TEC uno de los objetivos del presente trabajo fue el cálculo del TEC a partir de datos GPS.

Capítulo 3

Materiales y métodos

En el presente capítulo se detallan los métodos y materiales que se utilizaron para elaborar la presente tesis. El primer método consistió en la catalogación de los eventos sísmicos registrados en el área de estudio para el período definido, para esto se consultó el catálogo en línea del SSN ¹. Una vez obtenida la información, se procedió a organizarla en tablas informativas (Ver **Tablas 3.2, 3.3 y 3.4**) y proyectarla en mapas ilustrativos (Ver **Figuras 3.2 y 3.3**). El segundo método consistió en la descarga, organización y tratamiento de datos GPS para el período de días de cada evento sísmico, esto a través de las plataformas en línea ofrecidas por el UNAVCO ² y CORS ³. El tercer método consistió en utilizar los datos GPS, previamente tratados, para el cálculo del TEC, del conjunto de días pertenecientes a cada evento sísmico, utilizando un programa de cómputo proporcionado por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, siglas en inglés) en los Estados Unidos y al cuál nos referiremos como “tequis”. Posteriormente, se consultó el índice geomagnético D_{st} , de cada día dentro del período en estudio, a través del portal <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> de la NASA. Finalmente, una vez que se obtuvo el TEC y el índice geomagnético se procedió a graficar sus respectivos comportamientos. La gráficación se llevó a cabo utilizando Julia ⁴, que es un lenguaje de programación dinámico de alto nivel y rendimiento para la informática técnica, proyectando el TEC por horas y en días en conjunto con el índice geomagnético.

¹<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

²<http://www.unavco.org/>

³<http://geodesy.noaa.gov/CORS/>

⁴<http://julialang.org/>

3.1. Eventos sísmicos

La primer fase consistió en la investigación del historial sísmico en la zona de estudio y durante el período de interés (Ver **Tabla 3.2**), esto con la finalidad de identificar los sismos de magnitud mayor o igual a 5.1 ($M \geq 5.1$) registrados en el área y poder establecer el rango de días para el cálculo del TEC, este es: cinco días antes del sismo, el día del sismo y los tres días posteriores.

De forma general, un total de veintiocho eventos sísmicos se registraron desde el año 2008 hasta el año 2015 en el estado de Oaxaca, México, de estos veintiocho eventos, tres corresponden a réplicas, estas réplicas no se consideraron para este estudio ya que presentan una magnitud menor o igual que el sismo principal. Por lo tanto, un total de veinticinco eventos fueron seleccionados. Las magnitudes de los sismos corresponden a las asignadas por el Servicio Sismológico Nacional de México, la magnitud mínima considerada para la recopilación de eventos fue de 5.1 y la mayor registrada durante el período de estudio fue de 6.6, a principios del año 2008. El año que presentó más eventos fue el año 2012 con diez eventos (considerando las tres réplicas) seguido del año 2014 con seis eventos, mientras que el menos activo fue el año 2008 con solo dos eventos. Para el año 2009, de acuerdo al SSN, no se registraron eventos sísmicos de $M \geq 5.1$ en el estado de Oaxaca. En cuanto a la variabilidad de magnitudes, éstas se muestran en la **Tabla 3.3** y en la **Figura 3.2**.

Durante el período de tiempo en estudio la zona Norte del estado de Oaxaca no presentó actividad sísmica de magnitud ≥ 5.1 , este hecho concuerda con las zonas sísmicas señaladas en el **Capítulo 1**, donde la zona Norte de Oaxaca se encuentra catalogada como zona sísmica de intensidad intermedia con sismos poco frecuentes. Al contrario, la zona Sur, catalogada como zona de sismos muy frecuentes de mayor magnitud y que generan daños, fue donde se registro la mayoría de los sismos de este trabajo. En general, catorce de los veinticinco eventos en estudio se presentaron cerca de las costas del estado de Oaxaca, ocho ocurrieron en el mar y tres tierra adentro. Su distribución por año de registro se encuentra en la **Figura 3.3**.

En relación a la catalogación de la magnitud de los sismos seleccionados, esta se encuentra dentro del rango de magnitud ligera a moderada y únicamente un evento de los veinticinco se encuentra entre magnitud moderada a fuerte (Ver **Figura 3.1**).

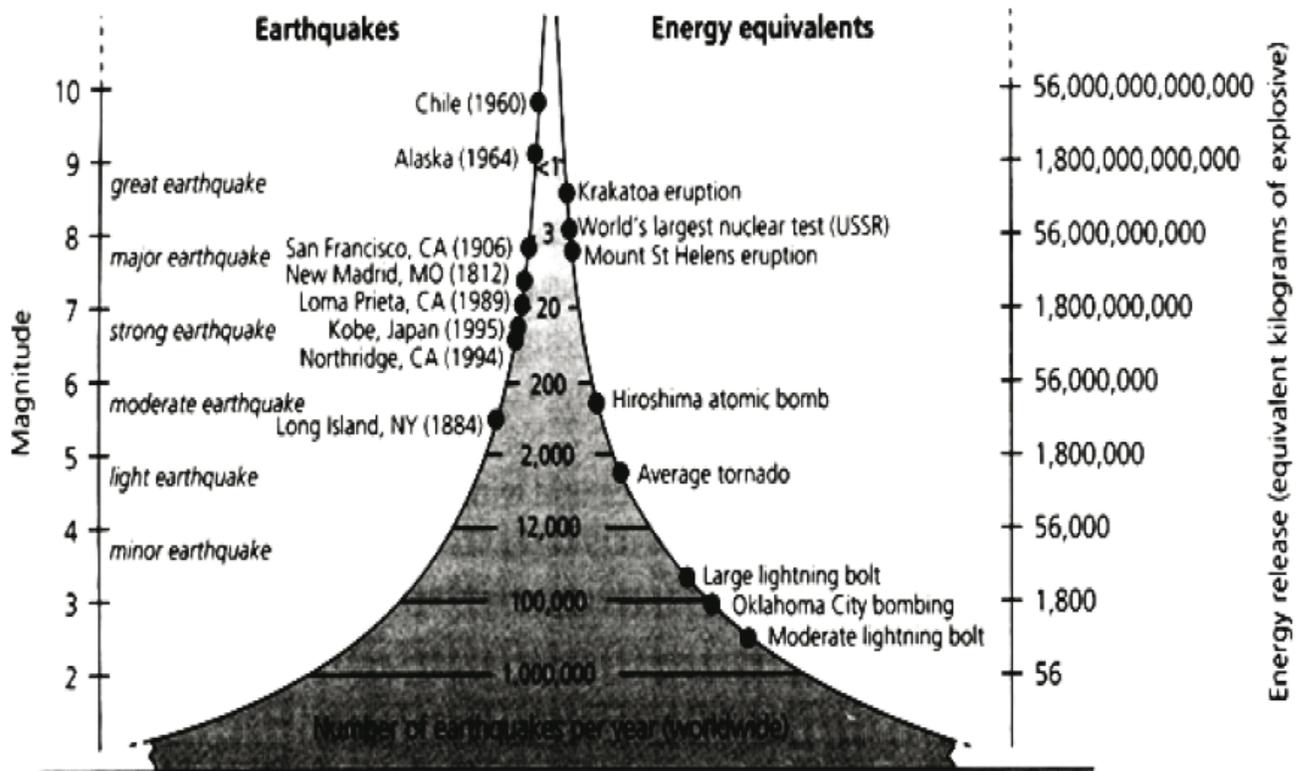


Figura 3.1: El número de eventos anuales (eje horizontal), la magnitud (eje izquierdo) y la energía en equivalente de trinitrotolueno (eje derecho) liberados anualmente por la actividad sísmica de la Tierra. Fuente: Pulinets y Boyarchuk (2004).

Tabla 3.1: Número de terremotos y energía liberada por año. Fuente: Pulinets y Boyarchuk (2004).

Magnitud (M_s)	Número por año	Energía liberada (10^{15} J/yr)
≥ 8.0	0-1	0-1000
7-7.9	12	100
6-6.9	110	30
5-5.9	1400	5
4-4.9	13 500	1
3-3.9	>100 000	0.2

Tabla 3.2: Eventos sísmicos seleccionados. Estos eventos se registraron en Oaxaca, México durante el período 2008 - 2015. El día/mes/año/hora/minuto son: la hora exacta del sismo (hora local); Latitud Norte y Longitud Oeste: las coordenadas geográficas del epicentro en grados. Con asterisco (*) los eventos considerados como réplicas y con P se denota la profundidad.

Evento	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Latitud	Longitud	Magnitud (SSN)	P (km)
1	12	2	2008	6	50	16.19	-94.54	6.6	90
2	30	7	2008	5	23	15.98	-96.10	5.1	49
3	8	2	2010	18	47	15.90	-96.86	5.8	37
4	16	4	2010	5	1	16.40	-98.41	5.1	10
5	25	6	2010	12	25	15.22	-96.44	5.1	12
6	30	6	2010	2	22	16.22	-98.03	6	8
7	9	7	2011	7	42	15.87	-96.42	5.3	22
8	13	8	2011	2	33	15.58	-94.88	5.7	16
9	10	12	2011	8	29	15.33	-94.79	5.2	16
10	17	2	2012	19	34	15.26	-95.67	5.3	16
*	17	2	2012	19	37	15.25	-95.64	5.2	14
11	20	3	2012	13	2	15.85	-98.72	5.2	15
*	20	3	2012	13	19	15.88	-98.48	5.1	15
*	20	3	2012	14	14	16.34	-98.28	5.2	15
12	2	4	2012	12	36	16.27	-98.47	6	10
13	13	4	2012	5	10	16.11	-98.34	5.2	14
14	22	9	2012	7	29	16.23	-98.30	5.4	2
15	29	9	2012	2	11	15.89	-98.67	5.5	15
16	17	12	2012	19	38	16.10	-95.87	5.3	20
17	26	3	2013	7	4	15.78	-96.52	5.4	10
18	9	3	2014	18	37	15.79	-96.30	5.8	16
19	21	5	2014	5	6	17.11	-95.07	5.8	121
20	24	5	2014	3	24	16.21	-98.42	5.7	18
21	10	8	2014	20	9	16.38	-98.19	5.2	10
22	13	8	2014	1	48	16.13	-98.35	5.4	10
23	11	10	2014	11	46	15.97	-95.61	5.6	10
24	28	4	2015	13	56	17.03	-95.19	5.5	113
25	28	6	2015	10	54	16.50	-94.89	5.6	84

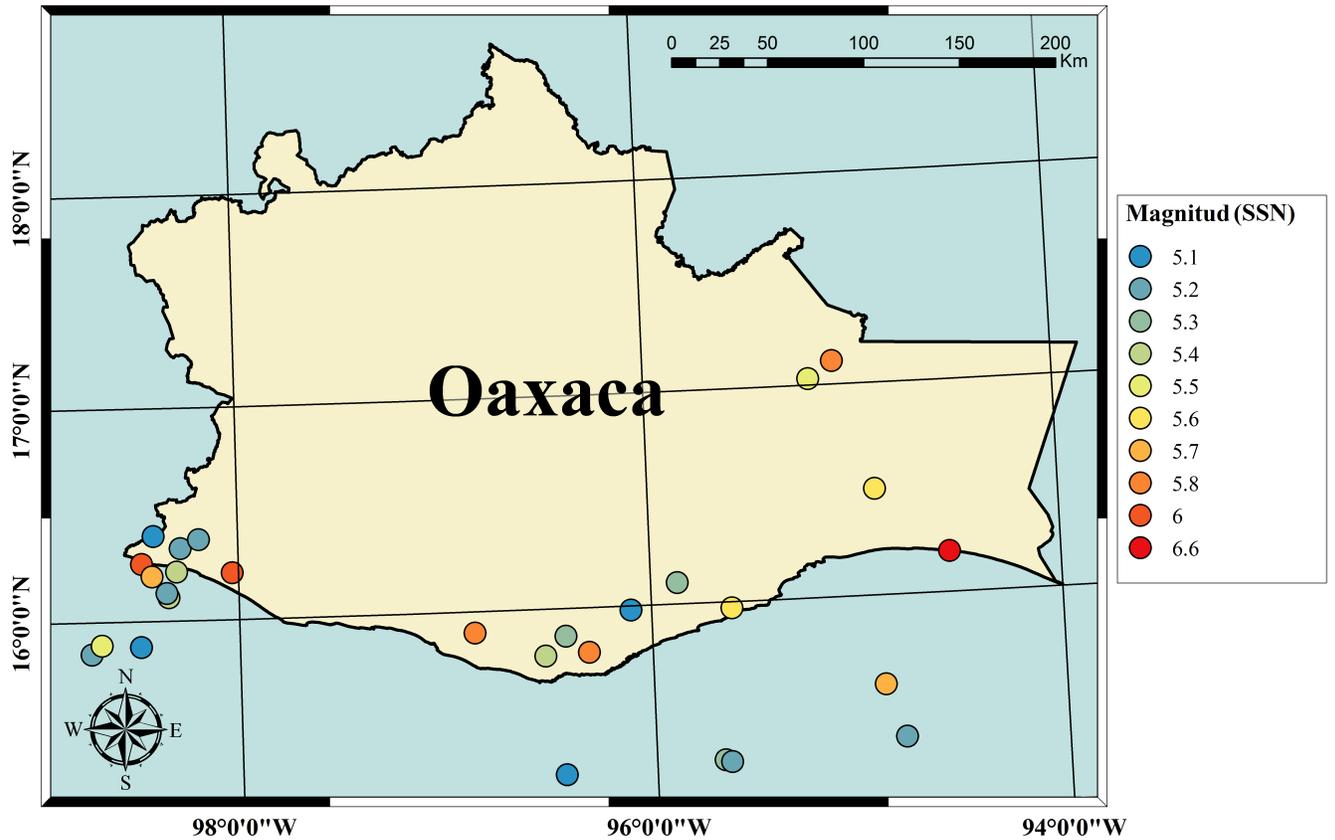


Figura 3.2: Mapa con la distribución de las diferentes magnitudes registradas durante los eventos sísmicos en estudio (incluye réplicas).

Tabla 3.3: Relación de la variación de las magnitudes de los eventos sísmicos en estudio.

Magnitud (SSN)	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	6	6.6
Eventos (25)	3	4	3	3	2	2	2	3	2	1
Porcentaje (%)	12	16	12	12	8	8	8	12	8	4

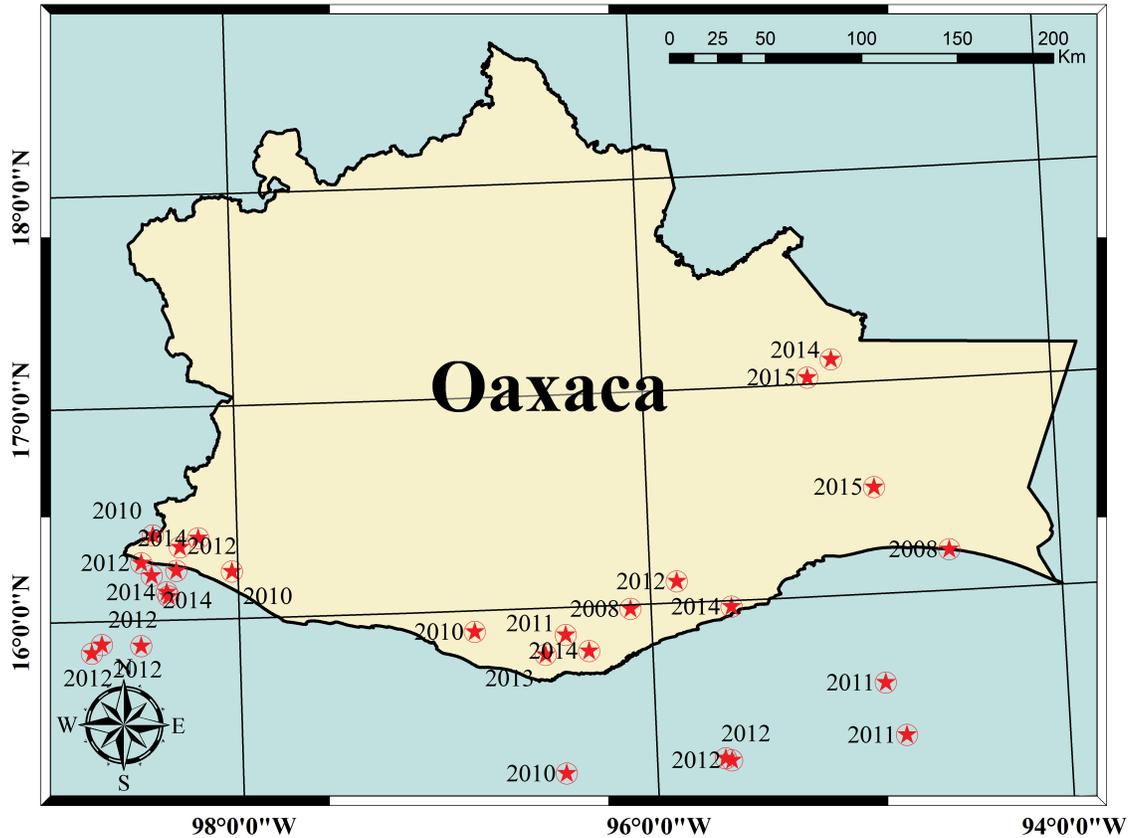


Figura 3.3: Mapa con la distribución del total de eventos sísmicos con base en su año de registro (incluye réplicas).

Tabla 3.4: Relación de los eventos sísmicos estudiados por año y su magnitud máxima registrada. Para el año 2012 las réplicas no fueron contadas.

Año	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Eventos	2	4	3	7	1	6	2
Magnitud máxima	6.6	6	5.7	6	5.4	5.8	5.6

3.2. Datos del GPS

La primer etapa de la segunda fase consistió en la selección de las estaciones GPS en el área de estudio. Una ilustración de las estaciones GPS elegidas en el área de estudio se observa en la **Figura 3.4** y su localización exacta en la **Tabla 3.5**. Dos de las estaciones, OXPE y OXTH, pertenecen a la red geodésica TLALOCNet de UNAVCO. TLALOCNet es una red atmosférica y tectónica, lo que la convierte en una red combinada, en México dedicada a resolver interrogantes relacionados al clima, a los procesos atmosféricos, al ciclo sísmico y a procesos tectónicos de México. La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) esta compuesta por un conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos GPS, distribuidas estratégicamente en el territorio nacional. Uno de los objetivos de esta red es proporcionar servicios de posicionamiento geodésico a los usuarios mediante datos en línea y es responsabilidad del INEGI. La estación GPS OAX2 de la RGNA, al ser la única de esta red geodésica instalada en el estado de Oaxaca, fue seleccionada. Por lo tanto, los datos espaciales utilizados en el presente estudio pertenecen a tres diferentes estaciones GPS (OXPE, OXTH, OAX2) localizadas en Oaxaca.



Figura 3.4: Estaciones GPS seleccionadas. Redes geodésicas: TLALOCNet de rojo, NGS (CORS) de azul y RGNA de amarillo.

Tabla 3.5: Coordenadas de los receptores GPS seleccionados en Oaxaca, México. Fuente: UNAVCO e INEGI.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Localización
OXPE	15.88°	-97.07°	Puerto Escondido
OXTH	16.28°	-95.24°	Tehuantepec
OAX2	17.07°	-96.71°	Centro de Oaxaca

La segunda etapa consistió en identificar el día del año GPS correspondiente al rango de días en estudio (cinco días antes, durante y tres días después). Para esto fue necesario consultar el calendario GPS ofrecido por el portal del CORS ⁵. Un total de nueve días del año GPS, por cada evento sísmico, fueron consultados y registrados. Posteriormente, la descarga de los datos espaciales, archivos de observación (esta***.o) y navegación (brdc****.n), fue realizada utilizando las herramientas ofrecidas por el administrador de la red geodésica correspondiente. En el caso del UNAVCO se utilizó la interfaz DAI v2 ⁶, la cual te permite descargar archivos espaciales dado un período de tiempo, facilitando la descarga. Para el caso de la RGNA ya se contaba con algunos datos. Sin embargo, fechas recientes pueden ser descargadas directamente de la página del INEGI ⁷.

Una vez hecha la descarga, se procedió a revisar si se disponía de los datos que correspondían a los días dentro del rango en estudio. Por lo tanto, una estación tendría que cumplir con todo el rango de días para cada evento sísmico. Los resultados se muestran en la **Tabla 3.6** donde se señala con un palomita la estación que cumple con todos los datos requeridos para ese año y con espacios vacíos la falta de datos. Cabe destacar que este paso fue crítico ya que a pesar de haber realizado la descarga de datos por año hubo estaciones que no contaban con datos para determinados días. Afortunadamente, y debido a que se seleccionaron tres estaciones, se logró cubrir todos los años.

Tabla 3.6: Disponibilidad por estación para el rango de días en estudio.

Año / Estación	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015
OAX2				✓			
OXPE	✓		✓		✓	✓	✓
OXTH	✓	✓			✓		✓

⁵<https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Gpscal.shtml>

⁶<http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html>

⁷<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/drgna2.aspx>

3.2.1. Formato RINEX

Los datos del GPS se encuentran en un formato denominado RINEX (del inglés Receiver INdependent EXchange). Este formato consiste principalmente de tres tipos de archivos: de observación (.o), de navegación (.n) y meteorológicos (.met) (Hernández et al., 2005). El formato RINEX se creó con la finalidad de facilitar el intercambio de datos GPS, permitiendo la gestión y almacenamiento de las medidas generadas por un receptor, así como su tratamiento con cualquier software (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). El formato incluye definiciones para tres observables GPS fundamentales: distancia, tiempo y fase.

A pesar de que en las primeras versiones únicamente se disponía de dos archivos, el de observación y el de navegación, hoy en día el formato RINEX se compone de los siguientes archivos:

- Archivo de los datos de observación (.o)
- Archivo con el mensaje de navegación (.n)
- Archivo de datos meteorológicos (.met)
- Archivo del mensaje de navegación del sistema GLONASS
- Archivo del mensaje de navegación GEO
- Archivo del tiempo del satélite y del receptor

Con la finalidad de facilitar el análisis de los archivos creados cada línea tiene un aproximado de ochenta caracteres. Además, cada archivo se compone de una cabecera y de una sección de datos. La cabecera contiene la información general del archivo como puede ser la relativa a la estación, el receptor o la antena. La sección de datos contiene los datos referentes al tipo de archivo. Los datos de observación y meteorología son creados para cada sesión y lugar, mientras que el mensaje de navegación es independiente de esto (Medina, 2010).

3.3. Cálculo del TEC

Como se mencionó en la **Sección 2.3**, la frecuencia dual del sistema GPS nos permite medir la diferencia de fase de dos señales (L1 y L2) de diferente frecuencia en cada satélite, este proceso es equivalente al cálculo del TEC.

El TEC se puede obtener a través de la medida de los códigos de pseudorange o por las mediciones de fase de la señal del GPS (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). En el caso de las mediciones de fase, esta puede ser modelada por:

$$\Phi = \left(\frac{\rho}{\lambda} + f\right)(\Delta\rho + N - \left(\frac{\Delta^{iono}}{\lambda}\right)) \quad (3.1)$$

Donde:

- ρ : Es el rango geométrico entre el satélite y el receptor.
- f : Es la frecuencia.
- λ : Es la longitud de onda y N es el número de ciclos.
- Δ^{iono} : Es el retraso ionosférico.

Una ecuación equivalente sería:

$$R = \rho + c\Delta\rho + \Delta^{trop} \quad (3.2)$$

Donde:

- c : Es la velocidad de la luz en el vacío.
- Δ^{trop} : Es el retraso troposférico.

Es bien conocido que el número de ciclos N inicial entre el satélite y el receptor es desconocido, por lo tanto esta ambigüedad de fase N permanecerá constante mientras no exista pérdida de señal.

El grupo y la fase de índices de refracción para una onda electromagnética que se propaga en el espacio con frecuencia f y un grupo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes pueden ser aproximadas por $n_{gr} = 1 - \left(\frac{c^2}{f^2}\right)$ y $n_{ph} = 1 + \left(\frac{c^2}{f^2}\right)$ y en términos de orden superior (Hofmann-Wellenhof et al., 2008),

Donde:

- $c = -40.3N_e$.
- $TEC = \int N_e ds_0$.
- N_e : Es la densidad electrónica.
- TEC : Es el Contenido Total de Electrones.

La dispersión, o tiempo de retardo entre señales de diferente frecuencia, proporciona una medida de la integral de TEC a lo largo de la trayectoria de propagación. La medida del rango esta definida por $s = \int nds$ y el rango geométrico por $s_0 = \int ds_0$. La diferencia entre ambos representa la refracción ionosférica, que es equivalente a $\Delta^{iono} = s - s_0$. Por lo tanto, de los modelos matemáticos anteriores es posible obtener los siguientes retrasos en metros: $\Delta_{gr}^{iono} = (\frac{40,3}{f^2})TEC$ y $\Delta_{ph}^{iono} = (\frac{40,3}{f^2})TEC$ (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Las ecuaciones de observación del GPS para el código de pseudorange son:

$$R_1 = \rho + c\Delta_\rho + \Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f1}^S + b_{f1}^R + m_{R1} + \epsilon_{R1} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \rho + c\Delta_\rho + \varkappa\Delta_{f1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f2}^S + b_{f2}^R + m_{R2} + \epsilon_{R2} \quad (3.4)$$

Donde:

- b_{f1}^S y b_{f2}^S : Son el retraso satélital.
- b_{f1}^R y b_{f2}^R : Son el retraso del receptor.
- m_{R1} y m_{R2} : Son los efectos de la multitrayectoria.
- ϵ_{R1} y ϵ_{R2} : El ruido del receptor.

Todos obtenidos por el código de pseudorange observado y por:

$$\varkappa = \left(\frac{f1}{f2}\right)^2 \quad (3.5)$$

Al combinar las ecuaciones anteriores y utilizando los pseudorangos observados se obtiene una expresión concisa, pero con ruido, para el cálculo del TEC:

$$TEC_R = 9,52(R_2 - R_1) \quad (3.6)$$

Las ecuaciones de observación del GPS a través de la medición de la señal de fase son:

$$\lambda_1 \Phi_1 = \rho + c\Delta_\rho + \lambda_1 N_1 - \Delta_{f_1}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_1}^{S,\Phi} + b_{f_1}^{R,\Phi} + m_{\Phi_1} + \epsilon_{\Phi_1} \quad (3.7)$$

$$\lambda_2 \Phi_2 = \rho + c\Delta_\rho + \lambda_2 N_2 - \Delta_{f_2}^{iono} + \Delta^{trop} + b_{f_2}^{S,\Phi} + b_{f_2}^{R,\Phi} + m_{\Phi_2} + \epsilon_{\Phi_2} \quad (3.8)$$

Donde:

- N_1 y N_2 : Ambigüedades desconocidas de la fase portadora.
- $b_{f_1}^{S,\Phi}$ y $b_{f_2}^{S,\Phi}$: Retraso satélital.
- $b_{f_1}^{R,\Phi}$ y $b_{f_2}^{R,\Phi}$: Retraso del receptor.
- m_{Φ_1} y m_{Φ_2} : Efectos de multitrayectoria.
- ϵ_{Φ_1} y ϵ_{Φ_2} : Ruido del receptor.

Dichos términos se derivan de las observaciones de la fase, en donde:

- $b^S = b_{f_1}^{S,\Phi} - b_{f_2}^{S,\Phi}$: Es el retraso diferencial del satélite.
- $b^R = b_{f_1}^{R,\Phi} - b_{f_2}^{R,\Phi}$: Es el retraso diferencial del receptor.
- $b^R + b^S$: Es el retraso total satélite-receptor.

Al combinar las ecuaciones anteriores, el TEC, utilizando la fase de la señal observada, es igual a:

$$TEC_\Phi = 9,52(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) \quad (3.9)$$

Al calcular el TEC utilizando la fase de la señal observada obtenemos una buena determinación de la variación de electrones en función del tiempo (Ver **Ecuación 3.9**) (Erickson, W. C. et al., 2001). El programa “tequis”, utilizado para calcular el TEC del presente trabajo, funciona de acuerdo a las ecuaciones previamente mencionadas. De forma general, “tequis” calcula los valores de TEC para cada una de las señales satelitales que recibe un receptor (satélite-receptor) resultando en diversos valores de TEC de acuerdo al número de satélites observados por el receptor, es decir el “slant TEC”. Una vez obtenido el slant TEC sus valores se proyectan y promedian sobre la vertical resultando en un valor correspondiente al VTEC. Es preciso mencionar que para el cálculo del VTEC solo se consideraron valores positivos. Además, para el cálculo del VTEC perteneciente al día 08 de julio de 2009, utilizado como referencia de un registro de VTEC sin afectaciones solares notables, se seleccionaron datos espaciales de la estación OXPE de UNAVCO.

3.4. Índice geomagnético D_{st}

La siguiente etapa consistió en la consulta y registro del índice geomagnético D_{st} para el rango de días de cada evento sísmico en estudio. El índice D_{st} registra las variaciones de la corriente del anillo ecuatorial del planeta (Mayaud, 1980).

Los parámetros ionosféricos pueden presentar variaciones incluso en ausencia de actividad sísmica, lo que hace difícil separar los fenómenos ionosféricos pre-sísmicos de los disturbios ionosféricos consecuencia de condiciones geofísicas solares y de tormentas geomagnéticas, especialmente en las regiones ecuatorial y polar (Akhoondzadeh, 2013). Debido a esto anomalías pre-sísmicas pueden ocultarse en los períodos de actividad magnética alta (Akhoondzadeh y Saradjian, 2011). Por lo tanto, para distinguir las perturbaciones sismo-ionosféricas de perturbaciones geomagnéticas se comprobó el índice geomagnético D_{st} a través del explorador de datos ONMIWeb de la NASA ⁸.

Una tormenta ionosférica natural suele durar de ocho a cuarenta y ocho horas, mientras que las perturbaciones sismo-ionosféricas tienen una duración de tres a cuatro horas unos días antes del terremoto (Pulinets et al., 2003; Akhoondzadeh y Saradjian, 2011).

⁸<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

3.5. Representación de los datos

La última fase de la metodología consistió en hacer una representación gráfica de todos los datos obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo para posteriormente analizarlos y obtener resultados y conclusiones.

La herramienta utilizada para graficar fue Julia, a través de la interfaz PyPlot. La primer etapa consistió en graficar el VTEC, del rango de días que conforman a cada evento sísmico, por horas. Cada día denotado con un color distinto y resaltando el día perteneciente al año 2009. El eje de las X corresponde al tiempo de registro (horas) y el eje de las Y a las unidades de TEC registradas. Lo anterior con la finalidad de observar el comportamiento del VTEC a través de las horas. La segunda etapa consistió en graficar el VTEC en conjunto con el índice geomagnético D_{st} del rango de días en estudio. Esta etapa se gráfico por días, el eje de las Y corresponde a las unidades de medida del VTEC y del índice geomagnético seleccionado, el eje de las X al tiempo (días). La segunda etapa se realizó con la finalidad de identificar posibles anomalías ionosféricas que estuvieran relacionadas con actividad geomagnética alta.

Es necesario mencionar que en este estudio se consideró la denominada variación diurna. Esto se refiere a las variaciones diarias provocadas por cambios que ocurren en ciertas regiones de la ionosfera como consecuencia de la recombinación y unión de los electrones e iones (Rodrigues y Camargo, 2007). Entre las principales razones de la existencia de la variación diurna o diaria se encuentran: la radiación solar, por lo tanto la oscilación del día a la noche, la actividad geomagnética, la estación del año y la altitud y longitud. Sin embargo, existen variaciones que todavía están fuera del alcance de nuestra comprensión.

Por lo tanto, la tercer etapa consistió en graficar una aproximación del VTEC sin variación diurna, para esto se utilizaron los valores de VTEC del día del año 2009, realizando una diferencia entre los distintos registros de VTEC del rango de días en estudio y los registros del año 2009, obteniendo una matriz de diferencias. Lo anterior con la finalidad de obtener valores “filtrados” de VTEC, es decir valores sin variación diurna. En la última etapa se graficaron los resultados obtenidos una vez aplicadas las estadísticas seleccionadas: media, desviación estándar y varianza.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En el presente capítulo se muestran los resultados y análisis de los eventos que, de acuerdo a los resultados obtenidos de su media y desviación estándar (Ver **Figura 4.40**), tienen una tendencia mayor de presentar un registro de VTEC por encima del promedio. Sin embargo, para facilitar la lectura del presente trabajo, los resultados y análisis del resto de los eventos se encuentran disponibles en línea a través del siguiente enlace: <https://drive.google.com/open?id=0B5XRy7L5NX-GZTNNRkY0X0pDLTA>.

De forma general, las tablas con los registros máximos de VTEC presentadas a lo largo del capítulo siguen la siguiente nomenclatura: las columnas del renglón “Día” representan con números negativos la cantidad de días antes del evento sísmico, con el número cero el día del sismo y con números positivos los días posteriores al sismo. Las columnas del renglón “uTEC” corresponden al máximo de unidades de VTEC registradas para ese día. Para el caso del análisis del índice geomagnético D_{st} se consideraron los parámetros propuestos por Akhoondzadeh y Saradjian (2011), quienes consideran como condiciones geomagnéticas tranquilas un índice $D_{st} > -20$ nT. Además, se graficó todos los datos disponibles por estación (Ver **Tabla 3.6**). Por lo tanto, si un evento contaba con datos de dos estaciones distintas, dos gráficas fueron hechas. Esto, para posteriormente seleccionar aquellas gráficas que tuvieran menos brechas entre registros para su posterior presentación y análisis. A lo largo del presente trabajo se ha hecho referencia a la baja actividad solar registrada el año 2009, esta afirmación fue realizada con base en los trabajos de investigación de Tariku (2015), Sharma y Verma (2013) y de diversos reportes científicos consultados en <https://helios.gsfc.nasa.gov/scycle.html>. En relación a los valores máximo y mínimo de VTEC registrados el día 08 de julio del año 2009 se obtuvieron 18.44 uTEC como máximo y 0.05 uTEC como mínimo. Además, el promedio de VTEC registrado para este día fue de 6.46 uTEC.

4.1. Evento del 10/12/2011 ($M = 5.2$ SSN)

En Oaxaca en el año 2011 el SSN registró tres sismos de magnitud mayor a 5.1, el tercero, y presente, corresponde al evento número nueve de este trabajo. Este evento presentó una magnitud de 5.2 y se posiciona en la posición número diecinueve por su magnitud. Ocurrió el 10 de diciembre del año 2011 a las 08:29:16 horas, ciento cuatro kilómetros al sureste de Salina Cruz, Oaxaca, precisamente a $15^{\circ}19'48''$ de Latitud Norte y $94^{\circ}47'24''$ de Longitud Oeste. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO.

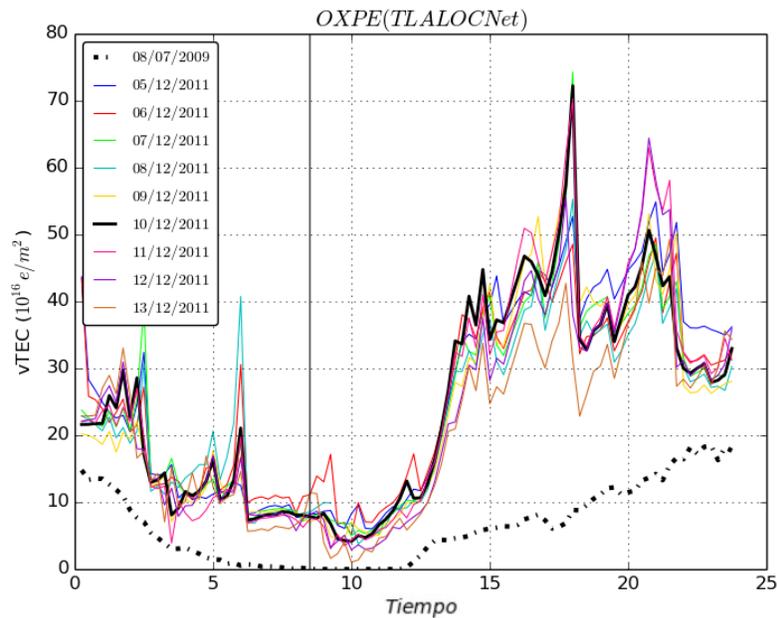


Figura 4.1: Evento sísmico número nueve. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

En la **Figura 4.1** se aprecian niveles altos de VTEC (> 70 uTEC) y un comportamiento similar entre el día del sismo y el tercer día antes del sismo. Respecto a cifras, se obtuvieron los siguientes registros máximos de VTEC para los días en estudio:

Tabla 4.1: Registros máximos de VTEC del evento número nueve.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	54.88	49.5	74.25	55.27	71.06	72.23	70.28	64.43	49.35

Tomando en cuenta que el día base registró un máximo de 18.44 uTEC, todos los registros de VTEC de este evento son registros inusuales. Con un máximo de 74.25 uTEC, cuatro veces más que el máximo base, tres días antes del sismo y un mínimo máximo de 49.5 uTEC cuatro días antes. El día del sismo se registró el segundo máximo con 72.23 uTEC. Para este evento es clara la pérdida y ganancia significativa en uTEC entre los días. Por ejemplo, del cuarto al tercer día antes se presentó un incremento de 24.75 uTEC para posteriormente registrar 74.25 uTEC tres días antes, seguido del registro de 55.27 uTEC dos días antes, lo cual implicó una pérdida de 18.98 uTEC. Finalmente, un día antes del sismo una ganancia de 15.79 uTEC se produjo (Ver **Tabla 4.1**).

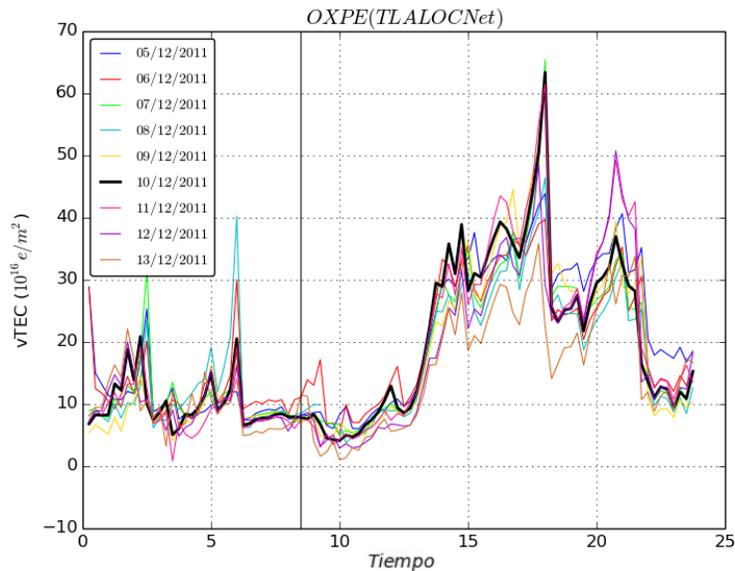


Figura 4.2: Evento sísmico número nueve. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

En cuanto a la hora del sismo, en los resultados obtenidos se observan dos picos registrados dos y tres días antes del sismo (no los registros máximos para estos días) horas antes de lo que posteriormente sería la hora del sismo (Ver **Figura 4.2 y 4.1**).

Tabla 4.2: Registros máximos de VTEC del evento número nueve sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	43.89	39.7	65.41	46.43	62.22	63.39	61.44	50.76	35.84

La relación entre el índice geomagnético D_{st} y el VTEC es en su mayoría inexistente para este evento (Ver **Figura 4.3**). La única excepción ocurre en el transcurso de la mañana-tarde del día del sismo ya que se presenta actividad geomagnética inferior a los -30 nT. Lo anterior descarta una relación entre el índice geomagnético en estudio y los niveles elevados de VTEC de este evento.

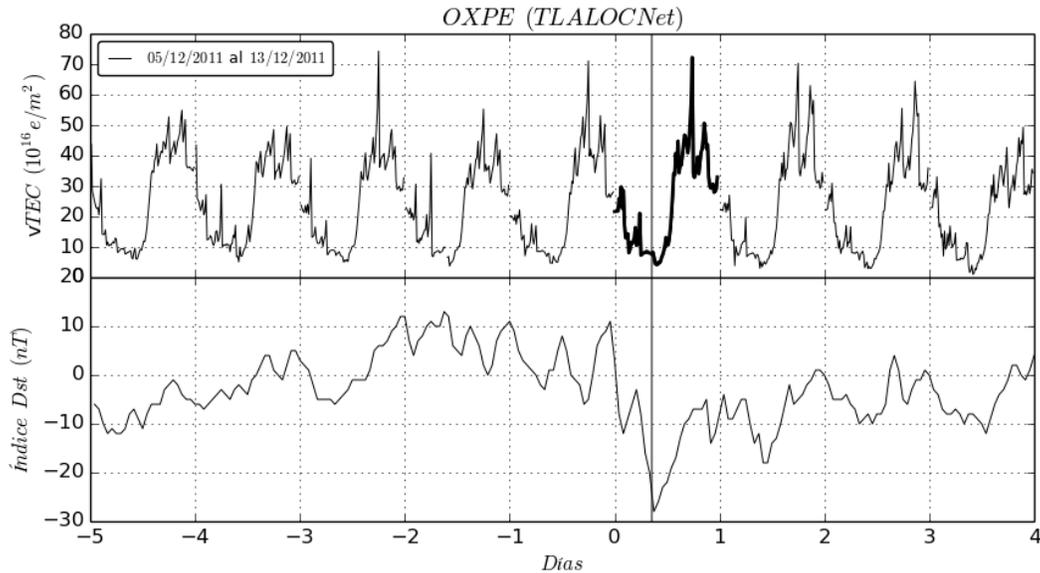


Figura 4.3: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número uno por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.2. Evento del 17/02/2012 (M = 5.3 SSN)

El evento sísmico número diez pertenece al año 2012 y sucedió el viernes 17 de febrero a las 19:34:19 horas (Ver **Figura 4.4**). Este evento presentó una réplica a las 19:37:58 horas, de menor intensidad (M = 5.2 SSN). La intensidad del evento principal fue de 5.3 y de acuerdo al SSN se ubicó setenta y seis kilómetros al sureste de Crucecita, Oaxaca (15°52'12" de Latitud Norte y 96°25'12" de Longitud Oeste). Los datos espaciales utilizados para el cálculo de su VTEC pertenecen a la estación OAX2 (17°04'42" N, 96°43'00" W ¹) de la RGNA del INEGI.

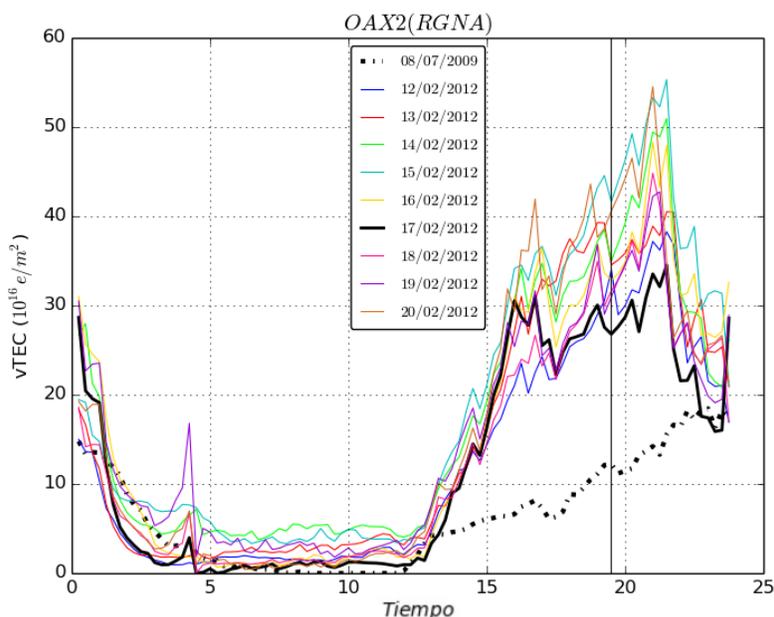


Figura 4.4: Evento sísmico número diez. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Una vez calculado el VTEC correspondiente, se obtuvieron los registros máximos de cada día dentro del rango en estudio. En la **Tabla 4.3** es posible observar un aumento de VTEC los cuatro días antes al sismo (desde $2 > \text{uTEC}$ hasta $< 11 \text{ uTEC}$). El máximo registro de VTEC corresponde a dos días antes del sismo con 55.32 uTEC, el mínimo

¹Coordenadas geodésicas de la estación OAX2.

máximo se registró el día del sismo con 34.53 uTEC. Es importante señalar que un día antes del sismo el VTEC cayó 7.01 unidades, pasando de 55.32 uTEC a 48.31 uTEC.

Tabla 4.3: Registros máximos de VTEC del evento número diez.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	38.27	40.51	50.95	55.32	48.31	34.53	44.84	42.74	54.53

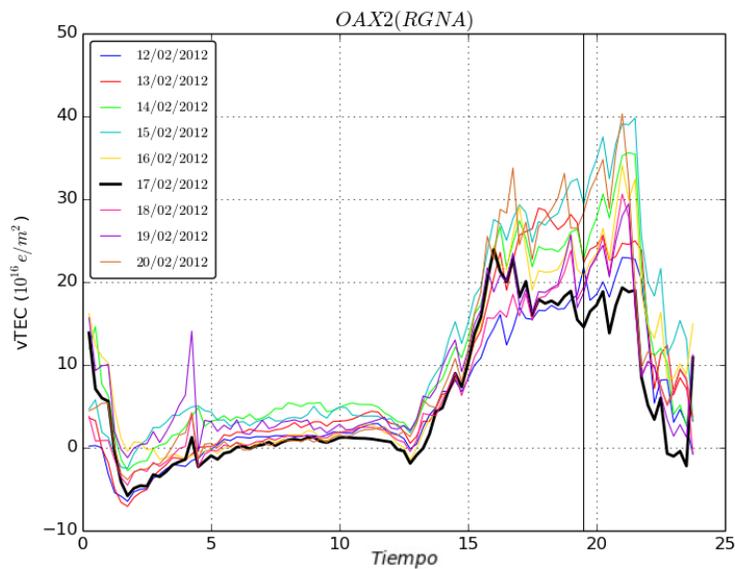


Figura 4.5: Evento sísmico número diez. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

En la **Figura 4.5** se observa que la hora del sismo ocurrió alrededor de las horas donde se registraron los niveles más altos de VTEC.

Tabla 4.4: Registros máximos de VTEC del evento número diez sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	22.96	28.93	35.61	39.79	34.09	23.92	30.62	29.44	40.31

En relación al índice geomagnético D_{st} este evento presentó actividad sobresaliente dos y tres días antes del sismo (Ver **Figura 4.6**). Alcanzando, aproximadamente, los -58 nT dos días antes del sismo. Además, dos días después del sismo el índice alcanzó, aproximadamente, los -52 nT. Esto podría estar relacionado con los resultados obtenidos para el VTEC de dos días antes al sismo.

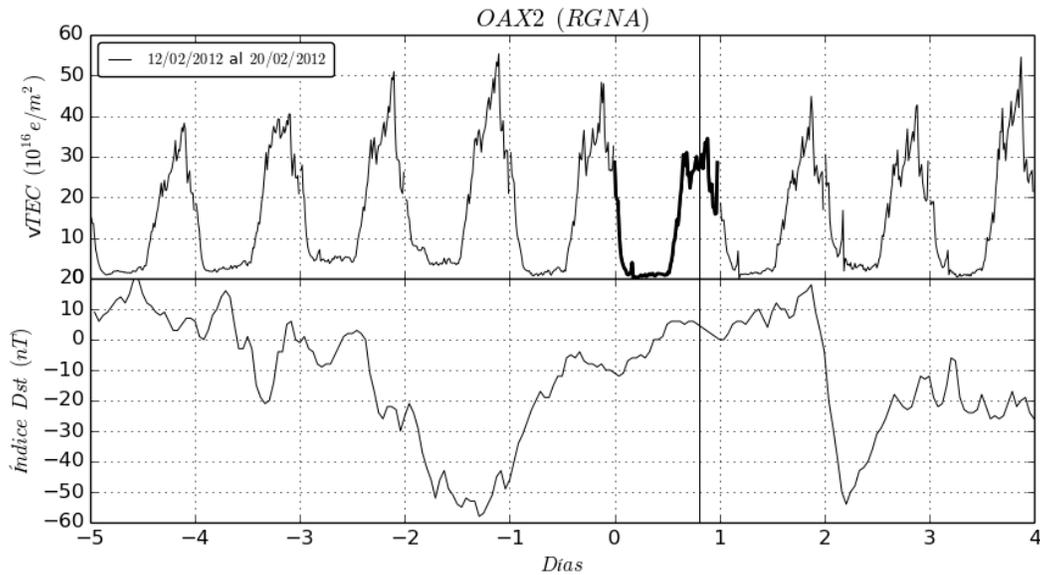


Figura 4.6: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diez por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.3. Evento del 20/03/2012 ($M = 5.2$ *SSN*)

El siguiente evento consistió en tres sismos registrados el mismo día, sus magnitudes fueron, en orden de registro, 5.2, 5.1 y 5.2. Como evento principal se seleccionó el primero registrado (5.2, por orden y representar la magnitud máxima registrada). Los demás fueron considerados como réplicas del mismo. Estos eventos sucedieron un martes 20 de marzo del año 2012 en un rango de tiempo comprendido desde las 13:02:39 hasta las 14:14:41 horas. El evento principal se registró noventa kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional, Oaxaca a una Latitud Norte de $15^{\circ}50'60''$ y una Longitud Oeste de $98^{\circ}43'12''$ (Ver **Figura**

4.7). Las réplicas, como ya se conoce, están localizadas en la misma región ² ³. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OAX2 de la RGNA.

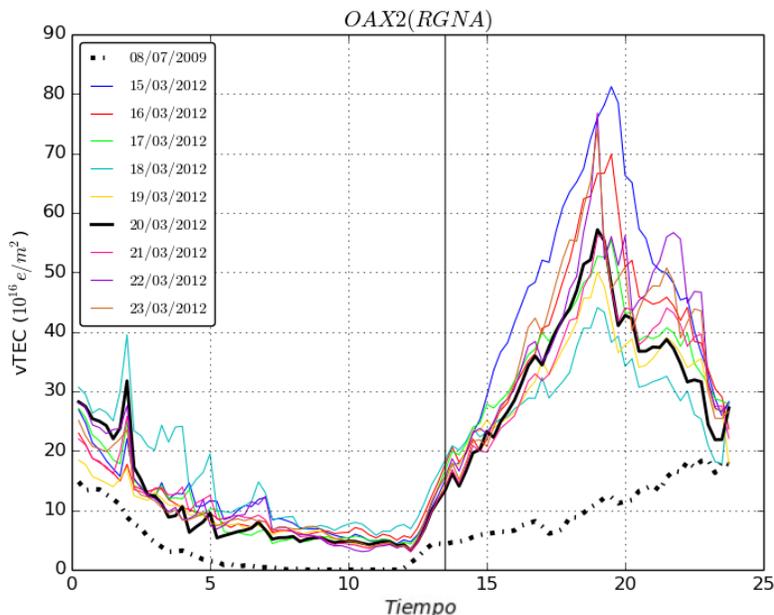


Figura 4.7: Evento sísmico número once. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Una vez calculado el VTEC de los días correspondientes a este evento se gráfico por horas (Ver **Figura 4.7**). La diferencia entre el día base, 08/07/2009, y la cantidad de VTEC de los días es clara, el día base no alcanzó, como máximo, las 20 uTEC, y para los días de este evento, en la gráfica, podemos apreciar valores superiores a las 70 uTEC.

Tabla 4.5: Registros máximos de VTEC del evento número once.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	81.22	69.82	55.39	44.08	50.02	57.17	56.1	76.77	74.09

En la **Tabla 4.5** se observa que el máximo registro de vTEC pertenece a cinco días antes del sismo, con 81.22 uTEC, después comienza a reducirse, con pérdidas mayores a 11

²Coordenadas geodésicas réplica 5.1 (15°52'48" N y 98°28'48" W).

³Coordenadas geodésicas réplica 5.2 (16°20'24" N y 98°16'48" W).

uTEC, hasta dos días antes del sismo. Un día antes del sismo una ganancia de 5.94 uTEC se presentó, comparado con las pérdidas en días anteriores, no supone un gran cambio. Dos y tres días después del sismo el VTEC aumenta considerablemente (hasta 20 uTEC).

En relación a lo observado en la gráfica que excluye la variación diurna de este evento (Ver **Figura 4.8** y **Tabla 4.6**) los niveles de VTEC obtenidos siguen prominentes y mantienen una forma similar (de subida), a excepción del día 18 de marzo de 2012 (dos días antes del sismo) donde una serie de crestas (la más evidente de ≈ 30 uTEC) fueron registradas.

Tabla 4.6: Registros máximos de VTEC del evento número once sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	69	57.60	43.17	32.94	38.88	46.03	44.96	65.63	62.95

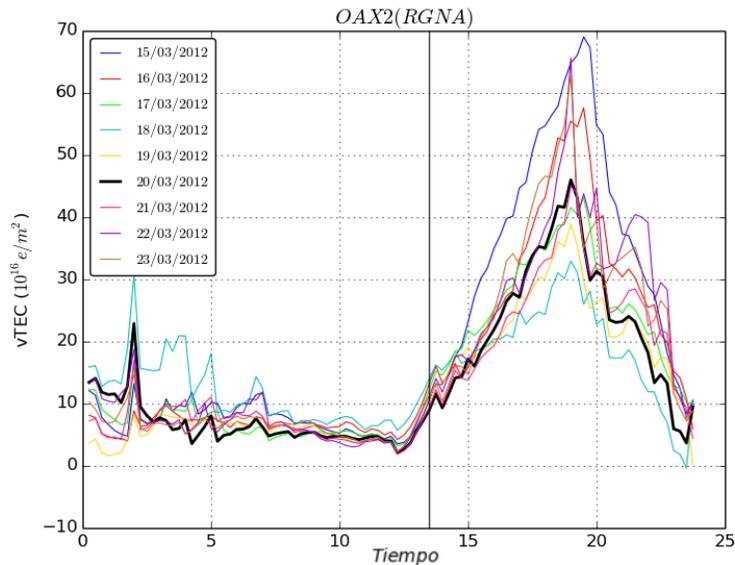


Figura 4.8: Evento sísmico número once. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

El evento once presenta actividad importante en el índice geomagnético D_{st} correspondiente al quinto día antes del sismo (≈ -70 nT) y actividad fuera de lo considerada como

tranquila (< -20 nT) los días restantes antes del sismo (Ver **Figura 4.9**). Sin embargo, para el segundo y tercer día después del sismo, días que obtuvieron el segundo y tercer máximo de VTEC, no se presenta actividad anormal.

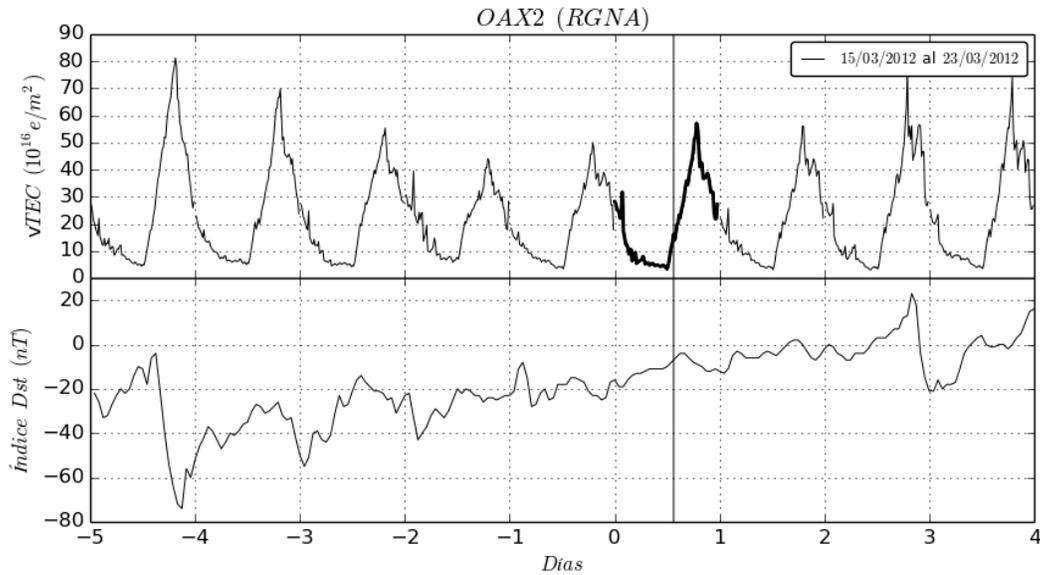


Figura 4.9: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número once por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.4. Evento del 02/04/2012 ($M = 6.0$ SSN)

El siguiente evento fue el más fuerte registrado en el año 2012 en Oaxaca, México, de acuerdo al catálogo del SSN. Sucedió el día lunes 02 de abril a las 12:36:42 horas cuarenta y cinco kilómetros al oeste de Pinotepa Nacional ($16^{\circ}16'12''$ de Latitud Norte y $98^{\circ}28'12''$ de Longitud Oeste) (Ver **Figura 4.10**). Con una magnitud de 6, con base al SSN, se posiciona en el puesto número tres en este trabajo. Sus datos espaciales pertenecen a la estación OAX2 de la RGNA del INEGI.

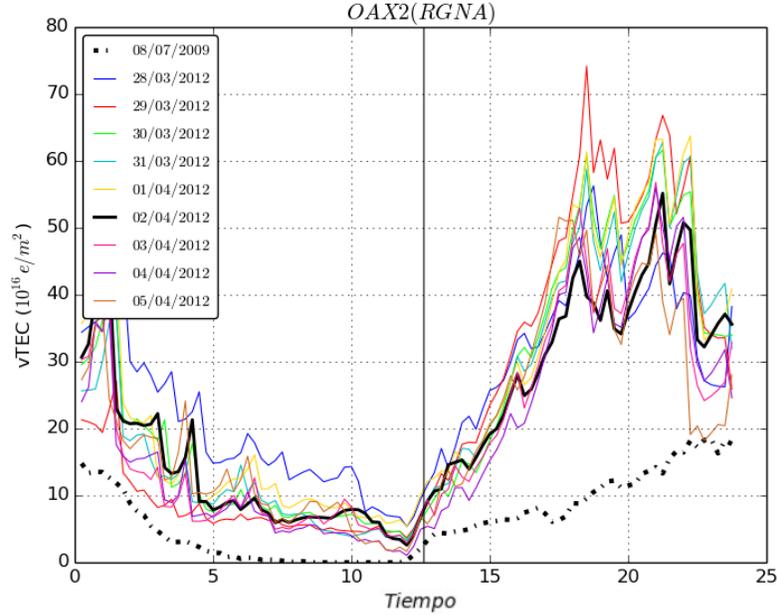


Figura 4.10: Evento sísmico número doce. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.7: Registros máximos de VTEC del evento número doce.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	56.28	74.15	61.6	62.76	63.72	55.16	56.81	56	51.58

En la **Figura 4.10** se observa que el día que más uTEC presentó fue el quinto día antes del sismo, en rojo, con 56.28 uTEC (Ver **Tabla 4.7**). El máximo registrado corresponde a cuatro días antes del sismo con 74.15 uTEC, un dato interesante en referencia al quinto día es su actividad geomagnética, ya que ese día el índice D_{st} alcanzó ≈ -60 nT, para recuperarse ese mismo día y continuar en condiciones tranquilas a partir del cuarto día antes del sismo y hasta el día del sismo. Sin embargo el máximo corresponde a cuatro días antes.

En relación al día base, 08/07/2009, el VTEC continúa elevado, con una diferencia entre sus máximos de 55.71 uTEC. Tres días antes del sismo un pequeño incremento de vTEC tiene lugar (≈ 1 uTEC). Sin embargo, el día del sismo se registró un decremento de 8.56 uTEC. Para este evento la pérdida y ganancia de VTEC no es tan significativa como

en otros.

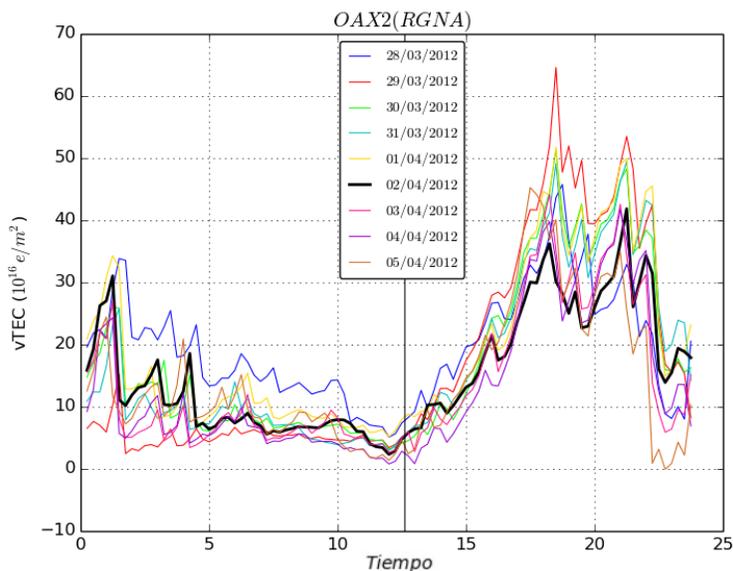


Figura 4.11: Evento sísmico número doce. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.8: Registros máximos de VTEC del evento número doce sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	45.77	64.59	51.31	49.46	51.8	41.86	44.16	41.78	45.26

En los resultados obtenidos, una vez tratada la variación diurna, el aumento registrado tres días antes en la **Tabla 4.7** se vuelve inestable dos días antes del sismo (Ver **Tabla 4.8**).

En referencia a su índice geomagnético D_{st} . La **Figura 4.12** muestra actividad fuera de la considerada tranquila cinco días antes del sismo, el día del sismo y tres días después de este (< -60 nT).

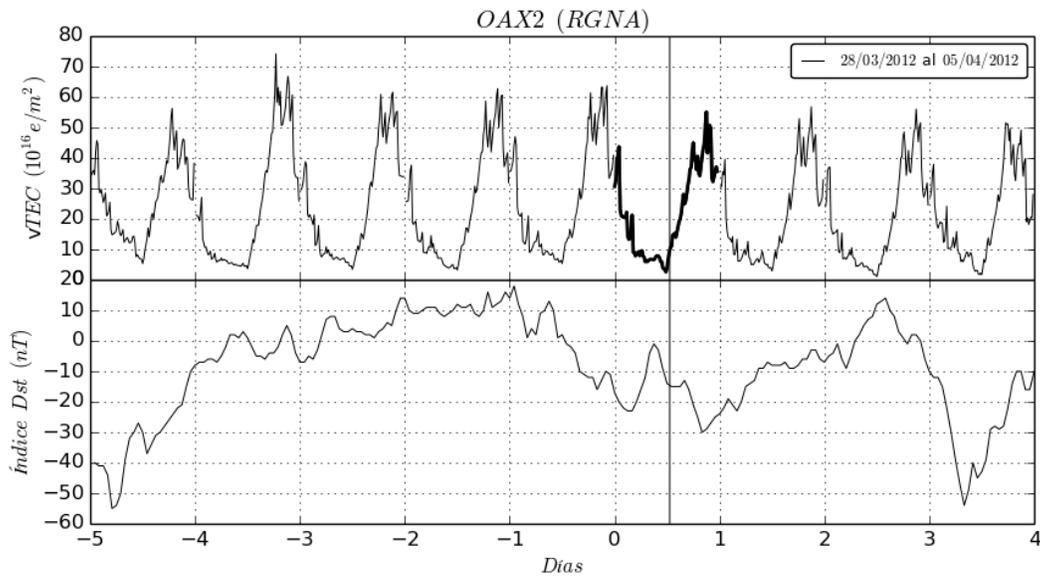


Figura 4.12: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número doce por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.5. Evento del 13/04/2012 ($M = 5.2$ *SSN*)

Del período de años 2008 a 2015 en Oaxaca el año 2012 fue uno de los más activos en cuestión de sismos mayores a 5.1, con un total de diez eventos (tres de ellos réplicas) registrados. El siguiente evento, número trece, tuvo una magnitud de 5.2 y sucedió el viernes 13 de abril del año 2012 a las 05:10:03 horas cuarenta kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional, exactamente a $16^{\circ}6'36''$ de Latitud Norte y $98^{\circ}20'24''$ de Longitud Oeste. Este evento ocupa la posición número veintiuno por su magnitud en este trabajo. Sus datos espaciales se obtuvieron de la estación OAX2 de la RGNA del INEGI.

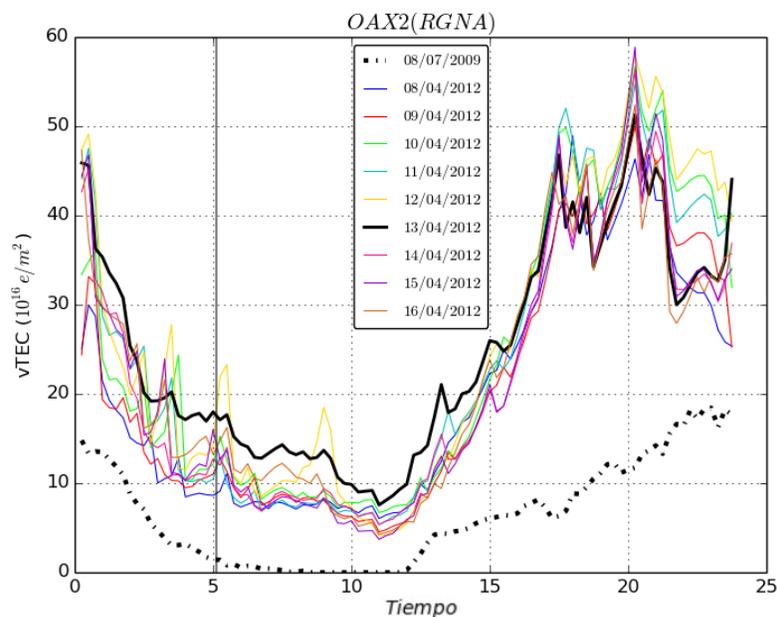


Figura 4.13: Evento sísmico número trece. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

En la **Figura 4.13** se pueden observar tres inusitadas crestas en el transcurso de la madrugada - mañana del día 12 de abril (un día antes del sismo, en amarillo). Además, éstas crestas rodean la hora en la que ocurrió el sismo, una de ellas sucediendo casi a la misma hora del sismo. En general, se observa un comportamiento muy semejante entre los días que integran este evento (Ver **Tabla 4.9**). En cuanto al día base, 08/07/2009, la diferencia entre los niveles de VTEC es notoria.

Tabla 4.9: Registros máximos de VTEC del evento número trece.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	48.91	49.99	56.7	54.77	57.94	51.3	56.27	58.87	52.42

Un aumento en el VTEC a partir del quinto día y hasta tres días antes se presenta en este evento, con un máximo de 58.87 uTEC dos días después del sismo y un mínimo máximo de 48.91 uTEC cinco días antes (Ver **Tabla 4.9**). Los diferentes aumentos y pérdidas de VTEC entre los días no superan las 7 uTEC. Por lo tanto, el comportamiento de los días es similar, a excepción de las crestas del día antes del sismo.

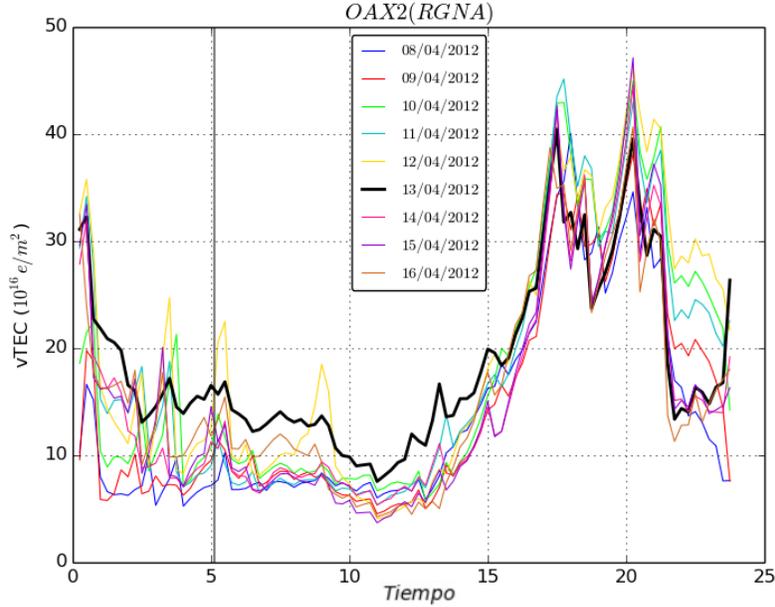


Figura 4.14: Evento sísmico número trece. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.10: Registros máximos de VTEC del evento número trece sin considerar la variación diurna

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	40.07	38.25	44.96	45.15	46.2	40.46	44.53	47.13	40.68

En la **Tabla 4.10** el incremento comienza a partir de cuatro días antes del sismo y hasta un día antes a este, perdiendo 5.74 uTEC el día del sismo. En la **Figura 4.14** los picos del día 12 de abril del año 2012 se observan con más claridad, así como el nivel elevado en el VTEC correspondiente a las primeras horas del día del sismo.

Para este evento la actividad geomagnética significativa comenzó un día antes del sismo (a últimas horas del día) y continuó hasta primeras horas del día del sismo (< 50 nT) (Ver **Figura 4.15**). La posible relación entre los picos registrados un día antes del sismo y el estado del índice geomagnético D_{st} correspondiente, al ocurrir en diferentes horas, no es muy clara.

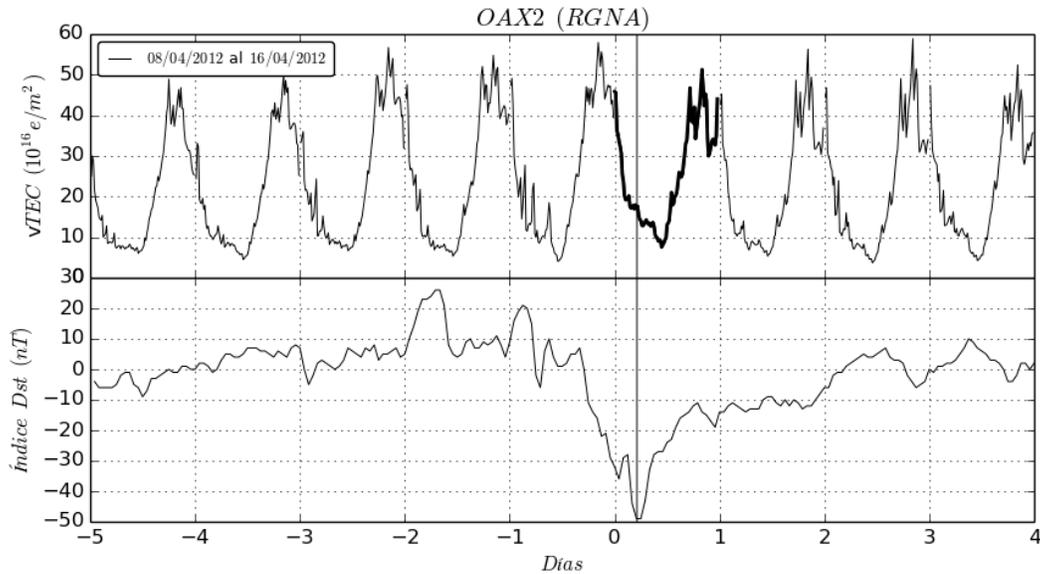


Figura 4.15: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número trece por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.6. Evento del 22/09/2012 ($M = 5.4$ *SSN*)

Continuando con el año 2012, el siguiente evento, número catorce, aconteció el sábado 22 de septiembre (aproximadamente cinco meses después) a las 07:29:57 horas veintinueve kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional, Oaxaca ⁴ (Ver **Figura 4.16**). Presentó una magnitud de 5.4, ocupando la posición número trece, por su magnitud, en este trabajo. Sus datos espaciales pertenecen, al igual que todos los eventos registrados en el año 2012 de este trabajo, a la estación OAX2 de la RGNA del INEGI.

⁴Coordenadas geográficas: 16°13'48" de Latitud Norte y 98°17'60" de Longitud Oeste.

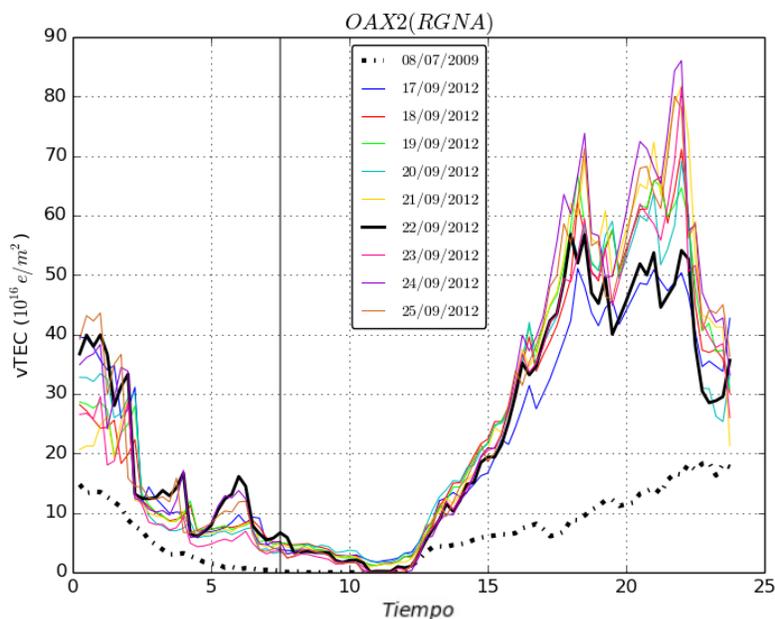


Figura 4.16: Evento sísmico número catorce. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.11: Registros máximos de VTEC del evento número catorce.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	51.07	71.11	66.8	69.07	81.77	56.8	81.53	86.05	79.98

Para este evento el máximo registro de VTEC fue de 86.05 uTEC, dos días después del sismo (incluido en los picos más altos de la **Figura 4.16**), el mínimo máximo corresponde a cinco días antes del sismo con 51.07 uTEC. En este evento las ganancias y pérdidas de VTEC se hacen notorias, en específico, cinco y cuatro días antes del sismo, donde se registró un incremento de 20.04 uTEC. Además, un día antes del sismo se registró una ganancia de 12.70 uTEC. El día del sismo hubo una pérdida de 24.97 uTEC, para luego ganar 24.73 uTEC y continuar aumentando y reduciéndose, sin cambios muy considerables, en días posteriores.

Los resultados obtenidos sin variación diurna (Ver **Tabla 4.12**) muestran valores elevados de VTEC (en especial los días posteriores al sismo). El registro máximo, de 69.62 uTEC, se presentó dos días después del sismo y el mínimo máximo, de 42.29 uTEC, cinco

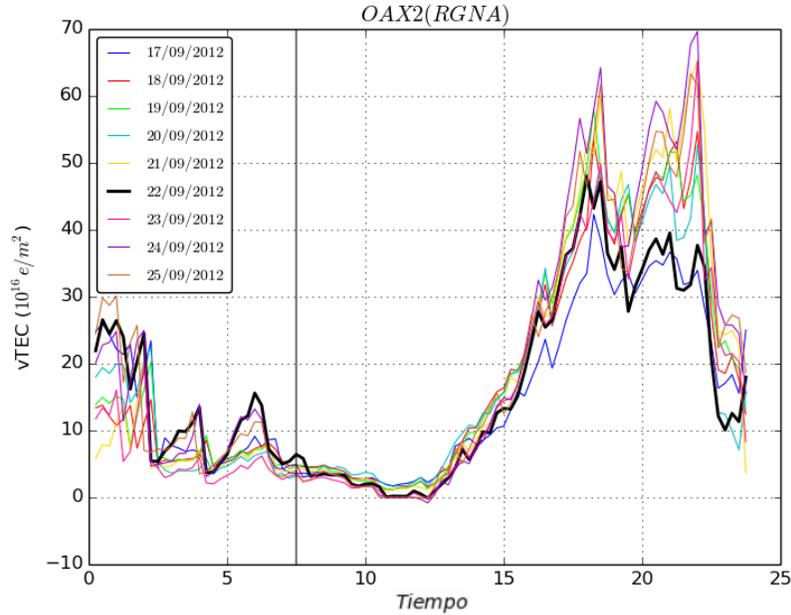


Figura 4.17: Evento sísmico número catorce. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.12: Registros máximos de VTEC del evento número catorce sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	42.29	54.68	58.02	52.64	65.34	47.96	65.1	69.62	63.36

días antes del sismo. Un incremento de VTEC se registró un día antes del sismo y fue de 12.7 uTEC. En relación a la hora del sismo no hay evidencia de incrementos de VTEC importantes para este evento (Ver **Figura 4.17**).

En relación a la actividad geomagnética, la única sobresaliente de este evento se registró a últimas horas del tercer día antes del sismo (para rápidamente recuperarse a primeras horas del segundo día antes del sismo) y sin alcanzar los -40 nT (Ver **Figura 4.18**). Por lo tanto, los niveles elevados de VTEC de este evento no están estrechamente relacionados con la actividad magnética registrada.

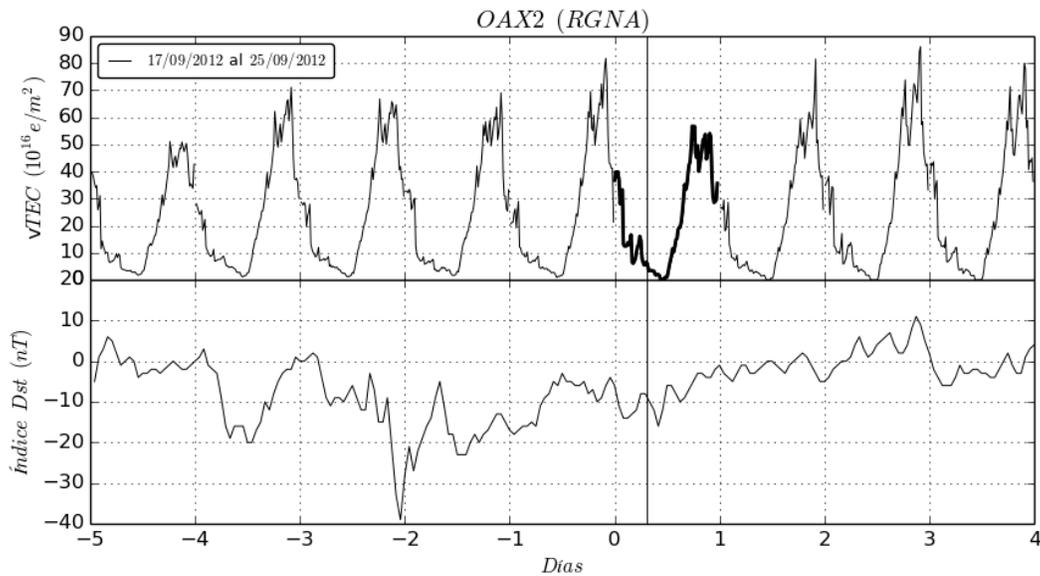


Figura 4.18: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número catorce por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.7. Evento del 29/09/2012 ($M = 5.5$ SSN)

El siguiente evento, número quince, sucedió solo siete días después del anterior y el mismo día de la semana. Un sábado 29 de septiembre del año 2012 a las 02:11:10 horas, ochenta y dos kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional, Oaxaca a $15^{\circ}53'24''$ de Latitud Norte y $98^{\circ}40'12''$ de Longitud Oeste (Ver **Figura 4.19**). De acuerdo al SSN este evento presentó una magnitud de 5.5, posicionándose en la posición número once, por su magnitud, en este trabajo. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OAX2 de la RGNA del INEGI.

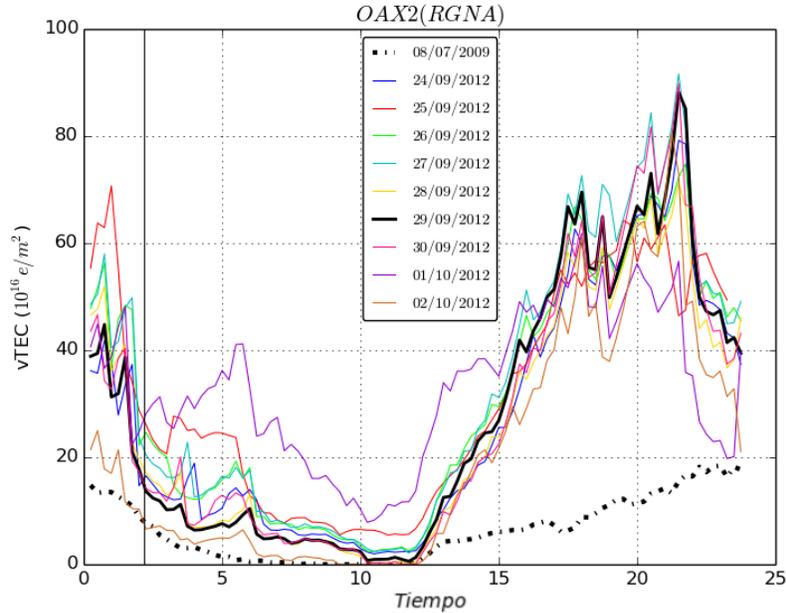


Figura 4.19: Evento sísmico número quince. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.13: Registros máximos de VTEC del evento número quince.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	79.2	70.7	74.8	91.58	71.26	88.21	89.86	61.83	80.61

En la **Tabla 4.13** se observan los valores máximos de VTEC obtenidos en cada uno de los días que componen este evento, como máximo tenemos el valor registrado dos días antes del sismo (91.58 uTEC) y como mínimo dos días después del sismo con 61.83 uTEC, a pesar de representar el mínimo máximo. En la **Figura 4.19** se observa que este evento presentó actividad sobresaliente a primeras horas del día (en rojo y morado) en comparación a los demás. A partir de tres días antes del sismo las pérdidas y ganancias de VTEC se hacen evidentes y significativas, por ejemplo, del tercer día al segundo día antes del sismo hubo una pérdida de 16.78 uTEC, posteriormente del segundo día a un día antes del sismo una pérdida de 20.32 uTEC se produjo, para luego ganar 16.95 uTEC el día del sismo. Para los días después del sismo la pérdida más significativa de uTEC sucedió dos días después con 28.03 uTEC.

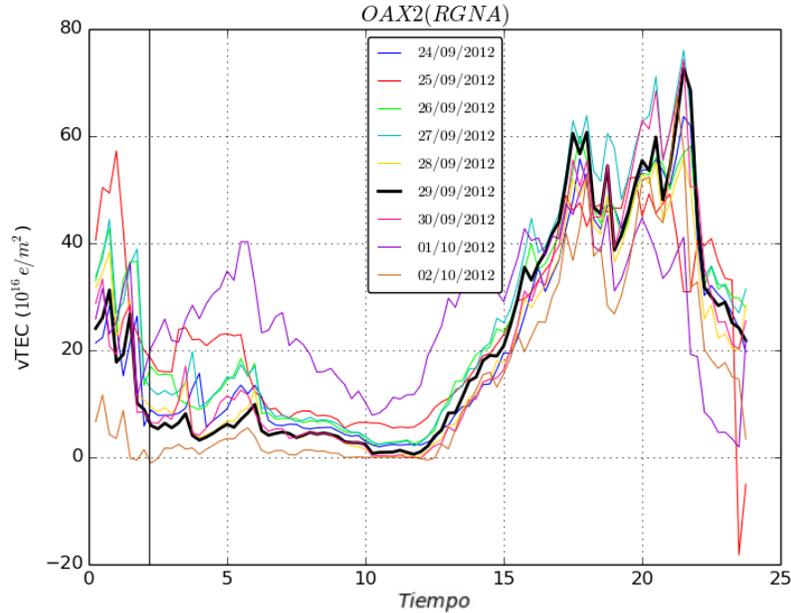


Figura 4.20: Evento sísmico número quince. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.14: Registros máximos de VTEC del evento número quince sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	63.67	57.2	59.97	76.05	55.73	72.68	74.33	52.99	67.31

En la **Tabla 4.14** y **Figura 4.20** los valores sin considerar la variación diurna se muestran. El valor máximo corresponde a dos días antes del sismo y el mínimo máximo a dos días después del sismo. El aumento en el vTEC diario se percibe a partir del cuarto día y hasta dos días antes del sismo, para los demás días los valores no son constantes (hay pérdida y/o ganancia de uTEC).

Para este evento la actividad geomagnética, en lo que al índice D_{st} se refiere, inusual esta descartada los días antes del sismo (Ver **Figura 4.21**). Para los días posteriores al sismo la actividad geomagnética va desde los -40 nT hasta ≈ -120 nT, aunque esta actividad, por ser posterior al sismo, no influye en el objetivo principal de este trabajo. Además en la **Figura 4.21**, en la parte correspondiente al VTEC por días, se observa como

dos días antes del sismo el VTEC aumenta hasta casi las 100 uTEC.

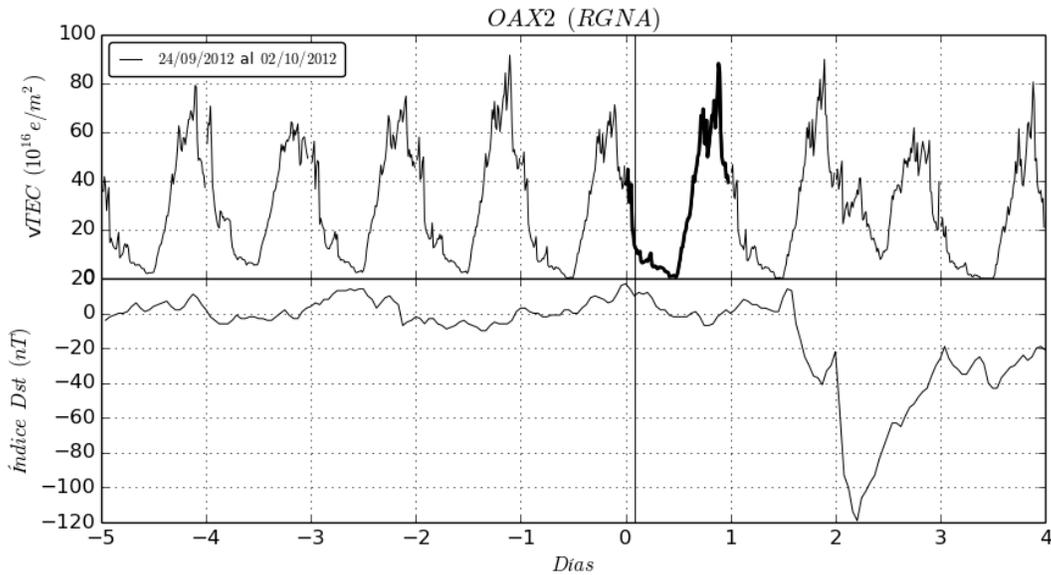


Figura 4.21: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número quince por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.8. Evento del 26/03/2013 ($M = 5.4$ SSN)

El siguiente evento fue el único registrado en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional, de magnitud mayor a 5.1, del año 2013 en Oaxaca, México. Este evento, el número diecisiete, ocurrió el martes 26 de marzo a las 07:04:45 horas ochenta y seis kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional (Ver **Figura 4.22**). Su magnitud fue de 5.4 y sus coordenadas geográficas son las siguientes: $15^{\circ}46'48''$ de Latitud Norte y $96^{\circ}31'15.92''$ de Longitud Oeste. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OXTH (16.28627 N, -95.24079 W ⁵) de la red TLALOC del UNAVCO. Este evento ocupa la posición número catorce, por su magnitud, en este trabajo.

⁵Coordenadas geográficas de la estación OXTH.

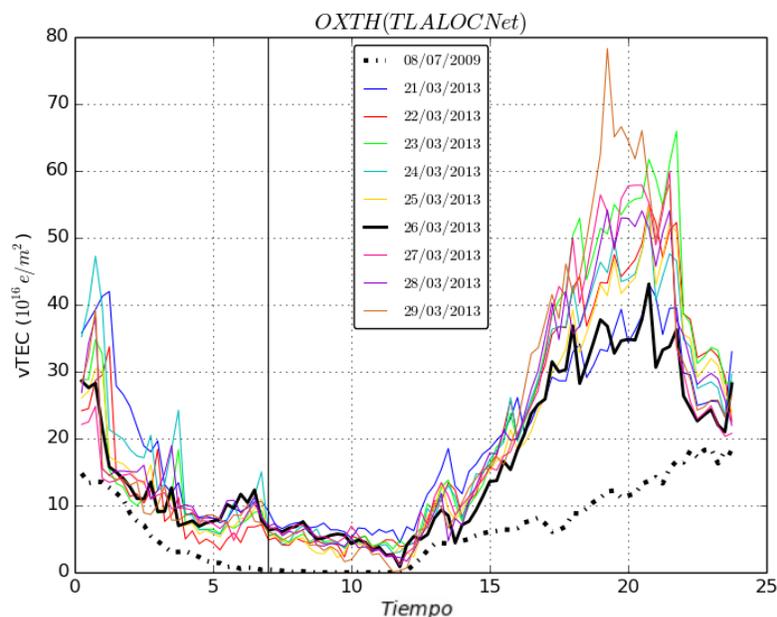


Figura 4.22: Evento sísmico número diecisiete. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

En la **Figura 4.22** se observa que en comparación con el día base, 08/07/2009, los días que componen a este evento presentan mayores niveles de VTEC. El comportamiento registrado el día del sismo, en línea negra, siguió un patrón semejante al registrado cinco días antes de este (en azul fuerte). En relación a la hora del sismo no existe una asociación visible con esta y el estado del VTEC.

Tabla 4.15: Registros máximos de VTEC del evento número diecisiete.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	43.07	54.97	65.93	54.03	54.81	43.11	59.91	54.15	78.27

El máximo registro de VTEC corresponde a tres días después del sismo con 78.27 uTEC, cresta café de la **Figura 4.22**. El mínimo máximo pertenece a cinco días antes del sismo con 43.07 uTEC. Este evento presenta registros similares entre los días de estudio (Ver **Tabla 4.15**), a excepción de ciertos días donde las pérdidas y ganancias son notorias, por ejemplo: del quinto día antes al cuarto día hubo una ganancia de 11.9 uTEC, del cuarto día antes al tercero una ganancia de 10.96 uTEC se produjo. Sin embargo, del tercer día

antes al segundo una pérdida de 11.9 uTEC aconteció, el día del sismo hubo una pérdida de 11.70 uTEC, esto indica que las ganancias y las pérdidas de este evento son equivalentes los días anteriores al sismo. Es importante señalar que los máximos registrados para los días posteriores al sismo pueden estar afectados por actividad geomagnética, al registrarse un índice geomagnético D_{st} inferior a los -20 nT.

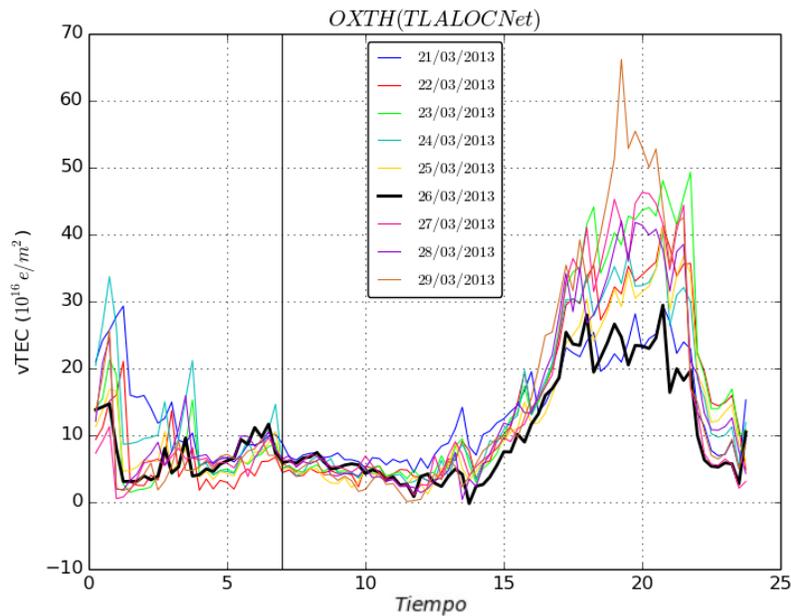


Figura 4.23: Evento sísmico número diecisiete. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

En la **Figura 4.23** se muestra el comportamiento por horas del VTEC sin considerar la variación diurna. El día 24 de marzo del año 2013 (dos días antes del sismo) una serie de crestas, inferiores a las 40 uTEC, ocurrieron cerca de lo que días más adelante sería la hora del sismo, esta observación ya se había hecho en el **Evento 4.5**.

Tabla 4.16: Registros máximos de VTEC del evento número diecisiete sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	29.4	41.3	49.31	40.36	41.14	29.44	46.27	42.04	66.16

En la **Tabla 4.16**, registros máximos de VTEC excluyendo la variación diurna, no se

observa un incremento ininterrumpido de VTEC, lo más próximo sucede dos días antes del sismo y hasta un día después. En relación al índice geomagnético D_{st} de este evento, los cinco días previos al sismo y los tres días posteriores a este presentaron actividad geomagnética elevada (hasta -70 nT). Como consecuencia, las 78.27 uTEC registradas tres días después del sismo, el máximo registrado, pudieron haber sido un efecto secundario de la actividad geomagnética de esos días (Ver **Figura 4.24**).

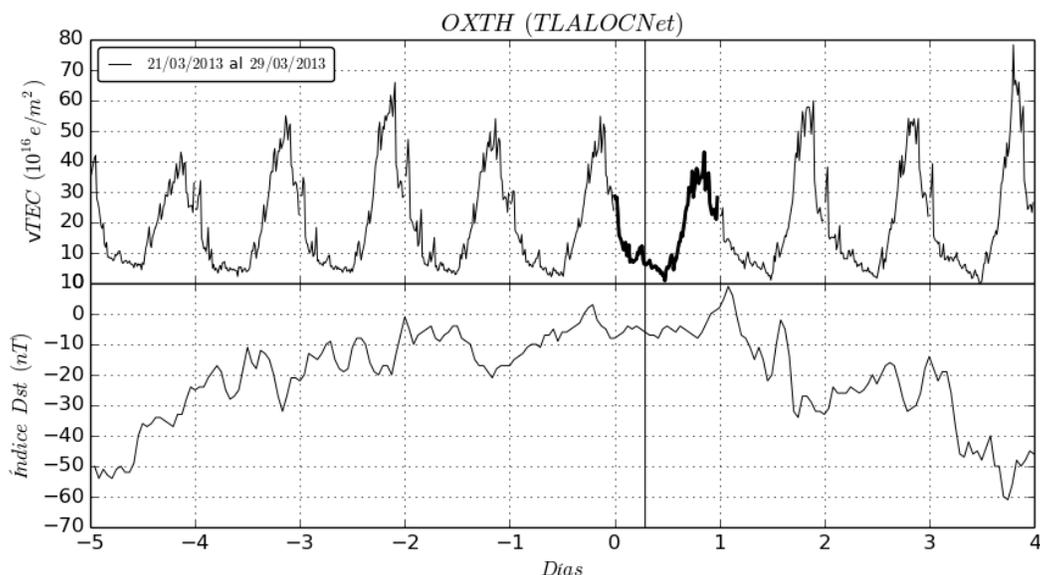


Figura 4.24: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diecisiete por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.9. Evento del 09/03/2014 ($M = 5.8$ SSN)

De los años estudiados en este trabajo, 2008 a 2015, el año 2014 fue el segundo año, detrás del año 2012, más activo en cuestión de sismos, con un total de siete eventos mayores a 5.1 de magnitud. Destacando dos eventos de magnitud 5.8 registrados a principios de año.

El evento dieciocho sucedió el domingo 09 de marzo del año 2014 a las 18:37:57 horas, ochenta y dos kilómetros al suroeste de Pinotepa Nacional (Ver **Figura 4.25**). Sus

coordenadas fueron las siguientes $15^{\circ}47'24.00''$ de Latitud Norte y $96^{\circ}18'33.56''$ de Longitud Oeste. Registrado con una magnitud de 5.8 por el SSN. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO. Por su magnitud ocupa la posición cinco en este trabajo.

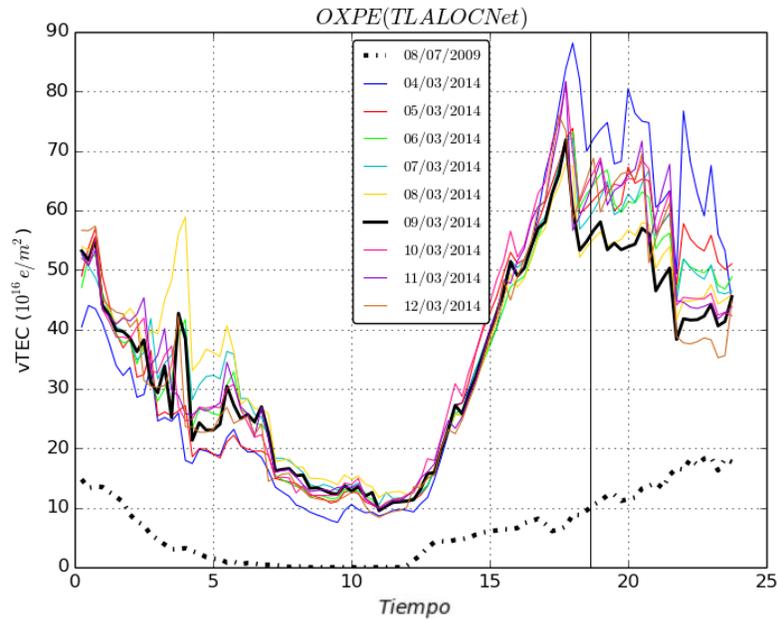


Figura 4.25: Evento sísmico número dieciocho. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.17: Registros máximos de VTEC del evento número dieciocho.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	88.14	73.8	73.2	72.08	67.87	71.86	81.68	81.62	76

Lo primero a notar en este evento es la elevada cantidad de VTEC que presenta. Siendo el registro máximo cinco días antes del sismo con 88.14 uTEC y el mínimo de los máximos con 67.87 uTEC, un día antes del sismo. Considerando que para el día base, 08/07/2009, el máximo fue de 18.44 uTEC la diferencia es notable (Ver **Figura 4.25**). En relación a la hora del sismo, esta se encuentra muy próxima al valor máximo registrado para el rango de días en estudio (línea azul). Además, en línea amarilla, se observa una anomalía de VTEC,

a primeras horas del día, un día antes del sismo, sin representar el máximo para ese día (Ver **Figura 4.25**). Esto, nuevamente, se registró en los **Eventos 4.5 y 4.8**.

Un pequeño aumento de VTEC, 3.99 uTEC, se presentó un día antes del sismo. Sin embargo, a excepción de la pérdida registrada del quinto día antes del sismo al cuarto, 14.34 uTEC, los valores de VTEC de los días anteriores al sismo permanecen semejantes. Respecto a los días posteriores al sismo, una ganancia de 9.82 uTEC se presenta un día después del sismo. Para los días anteriores y posteriores al sismo existen días con valores casi idénticos, estos son el cuarto y tercer día antes del sismo (73.8 y 73.2 uTEC) y uno y dos días después del sismo (81.68 y 81.62 uTEC) (Ver **Tabla 4.17**).

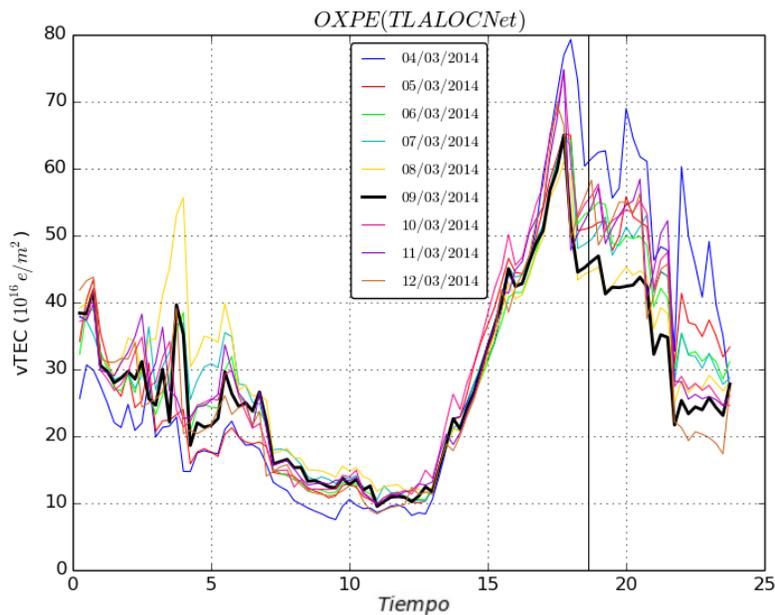


Figura 4.26: Evento sísmico número dieciocho. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.18: Registros máximos de VTEC del evento número dieciocho sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	79.3	65.24	64.71	65.01	60.99	64.98	74.8	74.74	69.68

Los resultados sin considerar la variación diurna se muestran en la **Figura 4.26** y en la **Tabla 4.18**. Aún sin considerar la variación diurna el VTEC continúa elevado, con un registro máximo de 79.3 uTEC para el quinto día antes del sismo y un mínimo máximo de 60.99 uTEC un día antes del sismo. Estos resultados no muestran un aumento continuo de VTEC entre los días de estudio. El comportamiento del VTEC un día antes del sismo (línea amarilla), a excepción del pico a primeras horas, resultó ser muy similar al comportamiento del día del sismo.

La actividad geomagnética del evento dieciocho no muestra nada de actividad inusual en su índice D_{st} , no alcanzando siquiera los valores de -15 nT (Ver **Figura 4.27**). Lo anterior deja sin explicación el valor máximo registrado cinco días antes del sismo y los altos valores de VTEC de todo el evento.

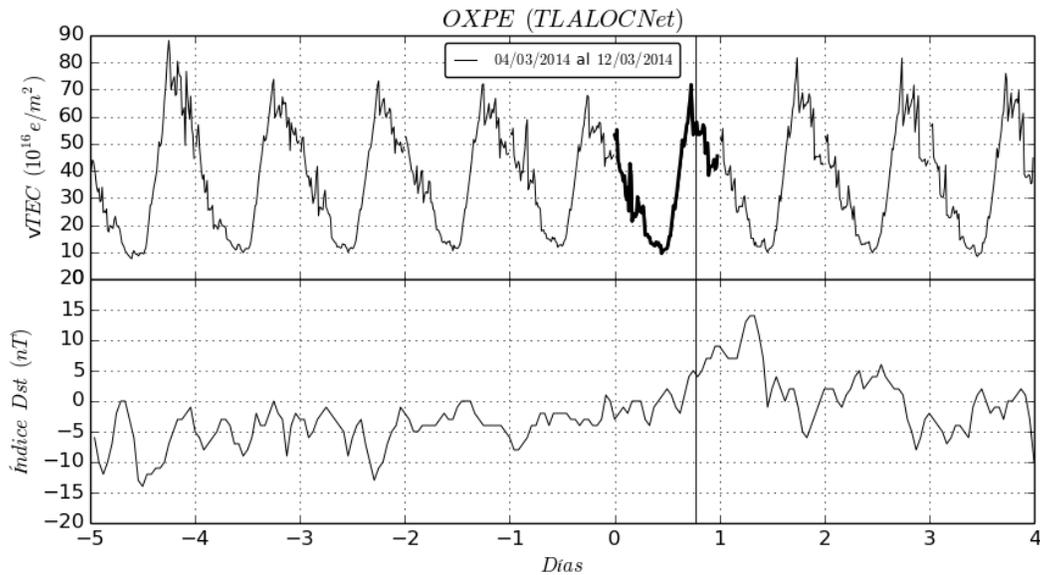


Figura 4.27: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número dieciocho por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.10. Evento del 21/05/2014 ($M = 5.8$ SSN)

El siguiente sismo ocurrió en el año 2014 y representa al evento diecinueve. Este tuvo lugar un miércoles 21 de mayo a las 05:06:15 horas, veintisiete kilómetros al Norte de la

localidad de Matías Romero a una Latitud Norte de , 17°6'36.00" y una Longitud Oeste de 95°4'12" (Ver **Figura 4.28**). Registrado por el SSN con una magnitud de 5.8. Una de las diferencias de este evento con el anterior de este año, ambos de igual magnitud, fue la profundidad, el evento dieciocho sucedió a una profundidad de 16 kilómetros y el presente a 121 kilómetros. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO. Por su magnitud ocupa la posición número seis en este trabajo.

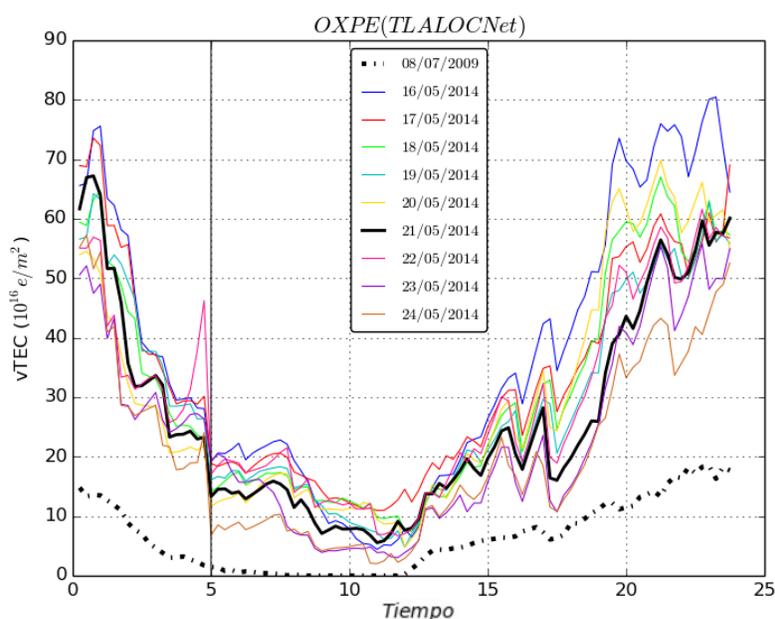


Figura 4.28: Evento sísmico número diecinueve. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.19: Registros máximos de VTEC del evento número diecinueve.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	80.47	73.57	67.01	64.22	69.82	67.21	61.6	55.83	57.28

Las primeras horas de los días involucrados en este evento presentan altos niveles de VTEC, lo mismo para las últimas horas esto crea un comportamiento en forma de U a la **Figura 4.28**, pocos eventos de este trabajo presentan ese comportamiento tan marcado. En la **Tabla 4.19** los máximos valores de vTEC registrado por día se presentan. El máximo

corresponde a cinco días antes del sismo con 80.47 uTEC, cercano al valor registrado en el evento anterior, y un mínimo máximo de 55.83 uTEC dos días después del sismo. Un incremento continuo de vTEC solo se presenta dos y un día antes del sismo, con 5.6 uTEC. Las pérdidas de VTEC más significantes de este evento ocurren antes del sismo. En la **Figura 4.28** se aprecia una cresta (línea rosa), a primeras horas del día, muy cercana a la hora del sismo, sin embargo al pertenecer a un día después del sismo su relevancia se reduce drásticamente.

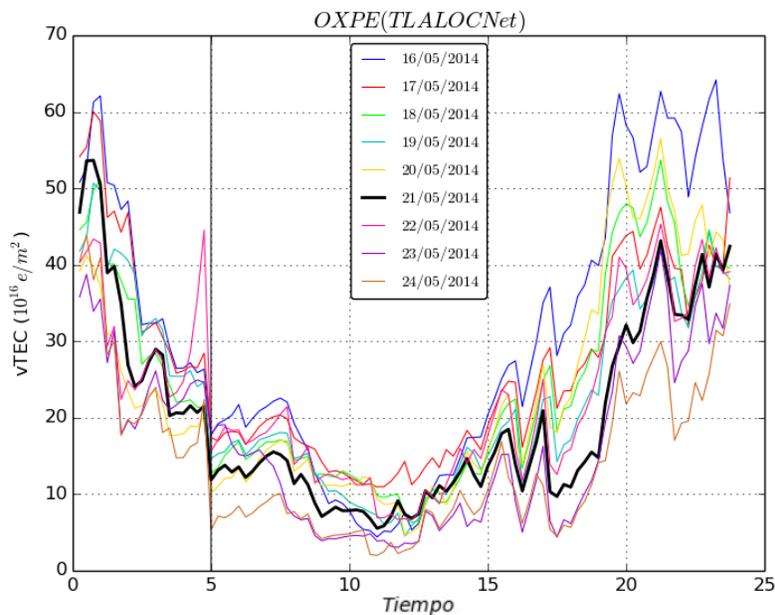


Figura 4.29: Evento sísmico número diecinueve. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.20: Registros máximos de VTEC del evento número diecinueve sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	64.17	60.02	53.71	50.67	56.52	53.66	45.32	42.07	43.93

En relación a los resultados obtenidos sin considerar la variación diurna, la **Figura 4.29** muestra el VTEC obtenido por horas de cada uno de los días trabajados en este evento. El valor máximo obtenido fue de 64.17 uTEC pertenecientes a cinco días antes del sismo

y el mínimo máximo corresponde a dos días después del sismo con 42.07 uTEC. Los días posteriores al sismo presentan menos vTEC que el de días anteriores, aproximadamente 10 uTEC menos. Además en la gráfica se observa (en línea amarilla y azul) como cinco días antes y un día antes del sismo el vTEC sobresale a últimas horas del día, esto en menor cantidad, pero también, para tres días antes del sismo (línea verde).

El índice geomagnético D_{st} correspondiente a dos días después del sismo presenta actividad fuera de los rangos considerados como tranquilos en este trabajo (≈ -40 nT) (Ver **Figura 4.30**). Sin embargo, esta actividad no se ve reflejada en el VTEC de los días posteriores al sismo ya que el VTEC de los días posteriores al sismo es menor que el registrado días antes del sismo y para estos días no hubo actividad geomagnética importante.

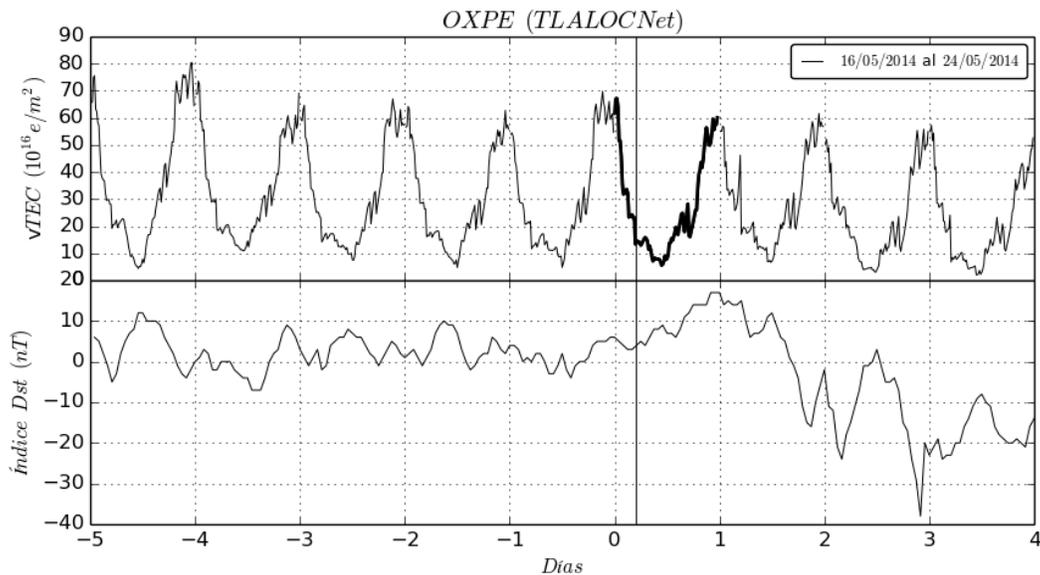


Figura 4.30: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número diecinueve por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.11. Evento del 24/05/2014 ($M = 5.7$ SSN)

El evento veinte sucedió un sábado 24 de mayo del año 2014, solo tres días después del evento anterior y en un horario cercano, a las 03:24:45 horas, cuarenta y dos kilómetros al suroeste de la localidad de Pinotepa Nacional, exactamente a $16^{\circ}12'36.00''$ de Latitud

Norte y a $98^{\circ}25'12''$ de Longitud Oeste (Ver **Figura 4.31**). Este evento tuvo una magnitud de 5.7 de acuerdo al catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México. Sus datos espaciales pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO. Por su magnitud ocupa la posición número ocho en este trabajo.

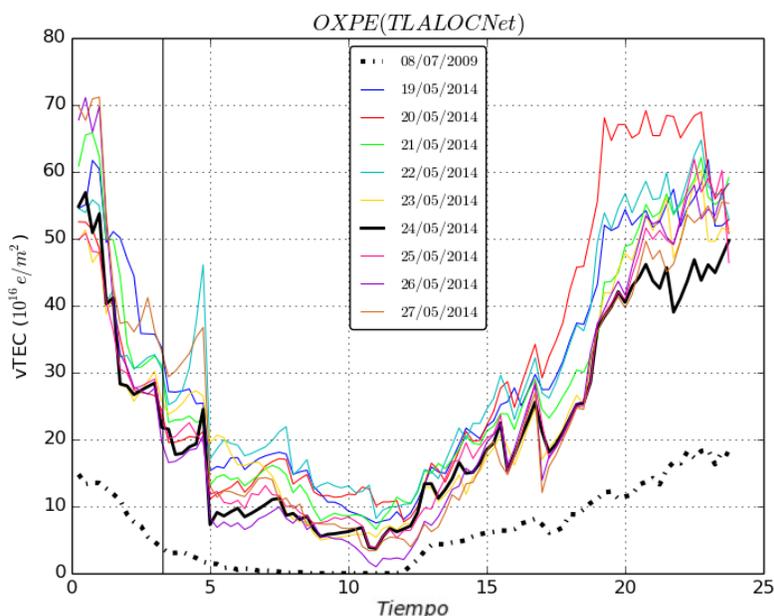


Figura 4.31: Evento sísmico número veinte. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.21: Registros máximos de VTEC del evento número veinte.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	61.82	69.16	65.84	64.75	60.28	56.91	61.88	71.1	71.18

La **Figura 4.31** muestra el comportamiento, por horas, del VTEC correspondiente a los días de este evento. Una de las primeras observaciones a realizar es sobre la cresta registrada cerca de la hora del sismo, la cual no sigue el comportamiento de los demás días y corresponde a dos días antes del sismo (línea azul claro). Cuatro días antes del sismo (línea roja) también se observa actividad inusual a últimas horas del día.

En relación al día base (línea punteada) todos los días presentan un alto nivel de vTEC. De la **Tabla 4.21** el máximo registrado corresponde a tres días después del sismo,

en la **Figura 4.31** se localiza a primeras horas del día (línea café). El mínimo máximo registrado pertenece al día del sismo con 56.91 uTEC. Para este evento los incrementos de vTEC continuos solo suceden del quinto al cuarto día antes del sismo (+7.34 uTEC) y a partir del día del sismo.

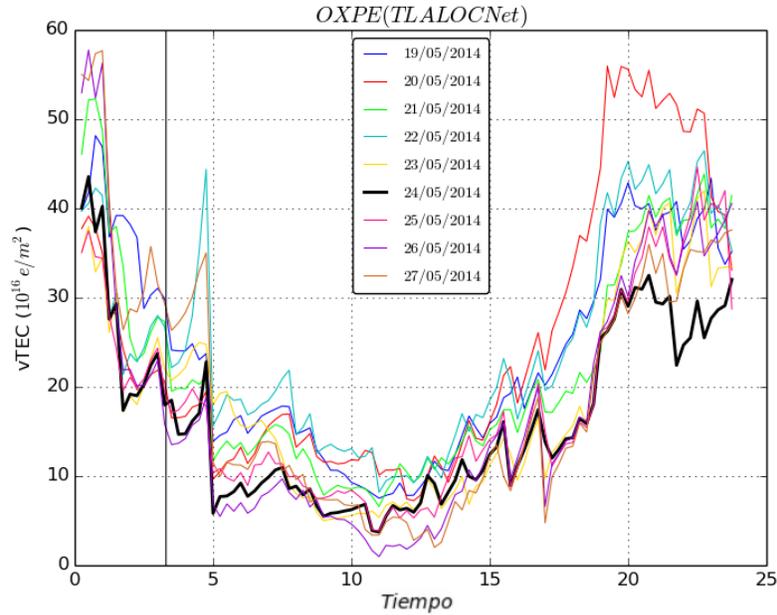


Figura 4.32: Evento sísmico número veinte. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.22: Registros máximos de VTEC del evento número veinte sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	48.16	55.95	52.29	46.47	42	43.56	44.64	57.75	57.68

En la **Figura 4.32** los resultados se aprecian con más claridad. Por ejemplo, la cresta, de dos días antes del sismo, a primeras horas del día (línea azul claro), así como los días que tienen un comportamiento menos cargado de VTEC (aquellos días que siguen el comportamiento del día del sismo o inferior a este). De la **Tabla 4.22** el mínimo máximo registrado corresponde a un día antes del sismo con 42 uTEC y el máximo a dos días después del sismo. Entre los incrementos continuos de VTEC tenemos los registrados cinco

y cuatro días antes del sismo (+7.79) además de los días posteriores al sismo, donde el incremento es continuo para todos los días. Respecto a la **Tabla 4.21** el máximo registro sufre un cambio de día.

Un día antes del sismo el índice geomagnético D_{st} alcanzó como máximo ≈ -40 nT momentos antes de la hora del sismo, este día fue el único con actividad geomagnética fuera de los rangos (Ver **Figura 4.33**).

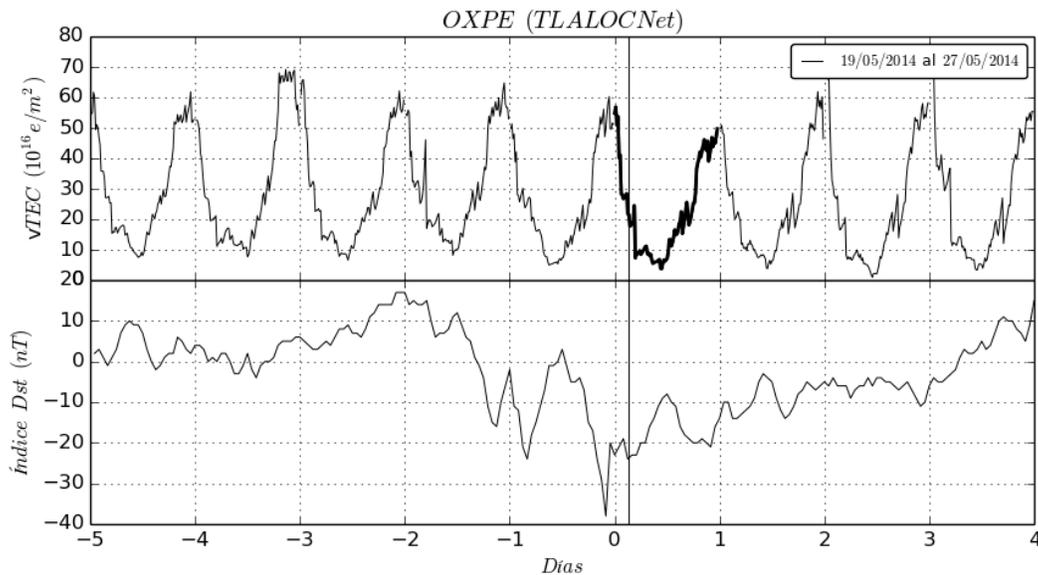


Figura 4.33: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veinte por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

4.12. Evento del 11/10/2014 ($M = 5.6$ SSN)

El sábado 11 de octubre del año 2014 a las 11:46:01 horas, cincuenta kilómetros al suroeste de la localidad de Salina Cruz, $15^{\circ}58'12.00''$ de Latitud Norte y $95^{\circ}36'36''$ de Longitud Oeste, se registró el evento número veintitrés (Ver **Figura 4.34**). Registrado en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México con una magnitud de 5.6 ocupa la posición número nueve, por su magnitud, en este trabajo. Los datos espaciales de este evento pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO. Este evento fue el último, de magnitud mayor o igual a 5.1, registrado en el año 2014.

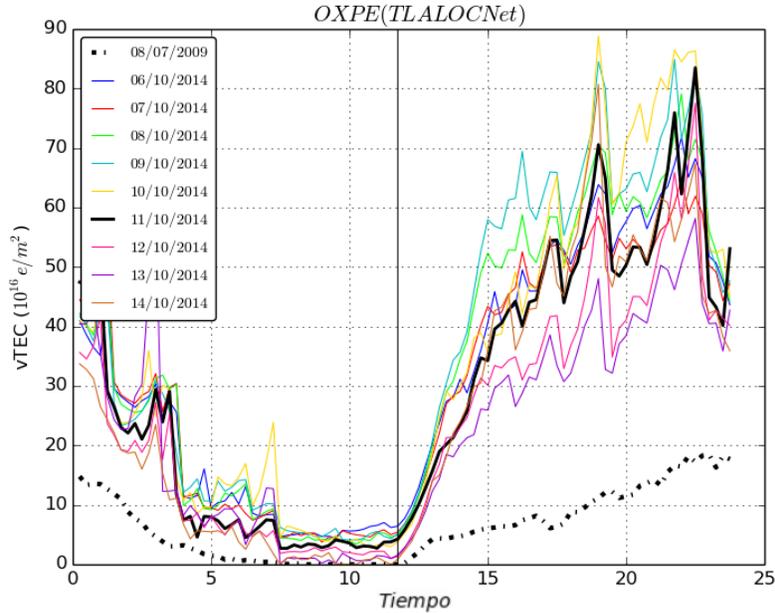


Figura 4.34: Evento sísmico número veintitrés. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.23: Registros máximos de VTEC del evento número veintitrés.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	71.82	64.81	79.09	84.88	88.85	83.5	77.57	60.73	80.71

Conforme las horas transcurren el VTEC aumenta, alcanzando sus puntos máximos entre las 17:00 y las 23:00 horas, los días anteriores al sismo (Ver **Figura 4.34**). Para este evento el máximo de VTEC registrado fue el de un día antes del sismo con 88.85 uTEC y el mínimo máximo corresponde a dos días después del sismo, con 60.73 uTEC. Un nivel anormal de VTEC perteneciente a un día antes del sismo se registro horas antes de la hora del sismo (línea amarilla). Comparado con el día base, 08/07/2009, este evento presenta niveles de VTEC elevados para todos los días (poco más de tres veces el registro máximo base). Un incremento continuo de vTEC se presenta a partir del cuarto día antes y hasta un día antes del sismo. En relación a pérdidas de vTEC, del quinto día antes al cuarto con 7.01 uTEC, un día antes al día del sismo con 5.35 uTEC, del día del sismo a un día después con 5.93 uTEC y de un día después a dos días después con 16.84 uTEC.

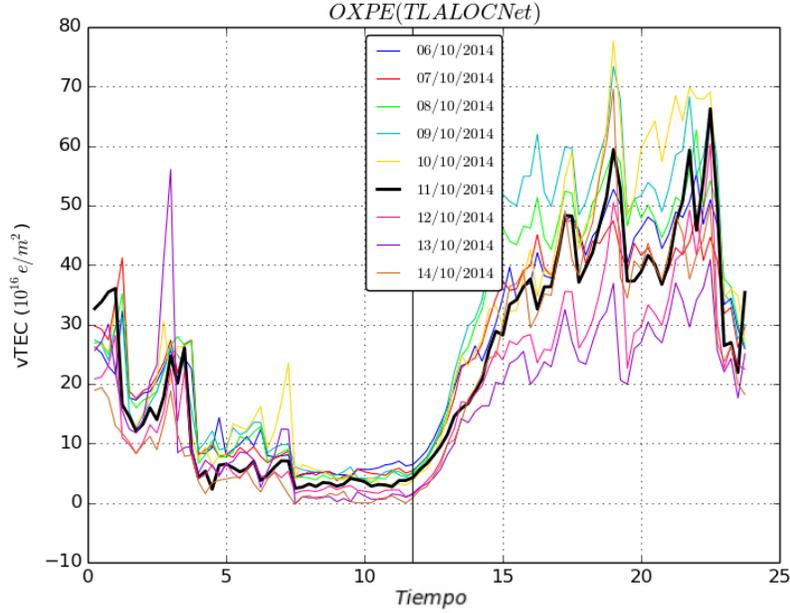


Figura 4.35: Evento sísmico número veintitrés. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

Tabla 4.24: Registros máximos de VTEC del evento número veintitrés sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	55.39	48.38	62.66	73.38	77.71	66.26	60.33	56.04	69.57

Los resultados obtenidos sin considerar la variación diurna se muestran en la **Tabla 4.24**. Un incremento continuo de VTEC comienza a partir del cuarto día antes del sismo y hasta un día antes de este. En la **Figura 4.35** se observa el incremento de VTEC correspondiente a los tres días antes del sismo (líneas azul claro, amarilla y verde). Un incremento evidente, a primeras horas del día, dos días después del sismo es visible en la **Figura 4.35**, este incremento inusual no tiene relación visible con el índice geomagnético D_{st} para ese día (Ver **Figura 4.36**). El máximo vTEC registrado, sin considerar la variación diurna, entre los días de estudio fue de 77.71 uTEC un día antes del sismo y el mínimo máximo fue de 48.38 uTEC cuatro días antes del sismo.

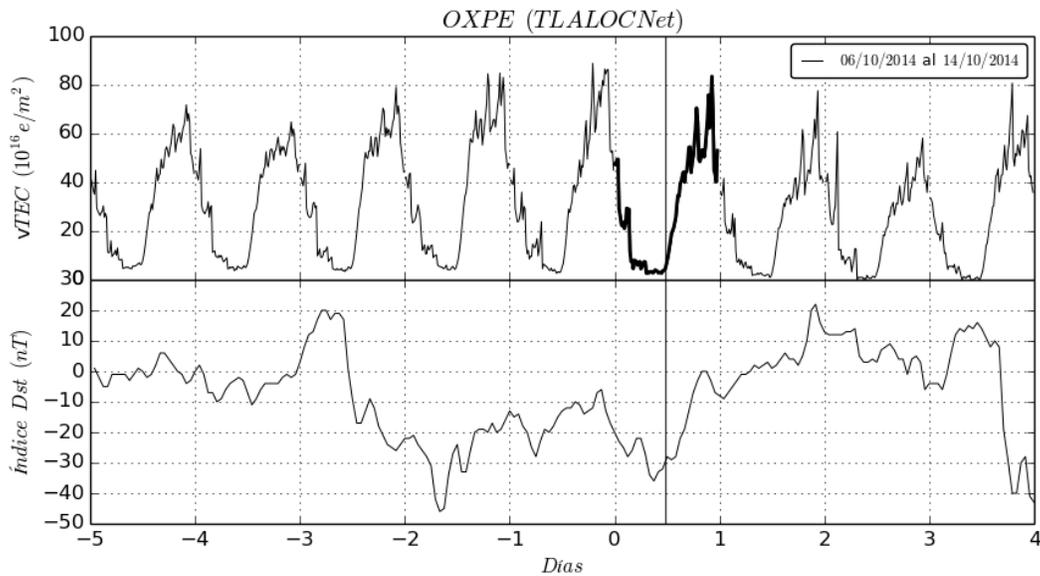


Figura 4.36: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veintitrés por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

El índice geomagnético D_{st} para este evento presenta bastante actividad fuera de la considera como normal en este trabajo. Comenzando a partir de las últimas horas del tercer día antes del sismo con aproximadamente -25 nT y finalizando a mitad del día del sismo (Ver **Figura 4.36**). Estos cuatro días que presentan actividad geomagnética coinciden con registros de niveles altos de VTEC, los más altos de los días de este evento, alcanzando las 80 uTEC en tres de ellos.

4.13. Evento del 28/04/2015 ($M = 5.5$ SSN)

El último año analizado corresponde al año 2015, durante el cual solo se registraron dos eventos de magnitud mayor o igual a 5.1, registrados en la primera mitad del año, en el estado de Oaxaca, esto de acuerdo al catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México.

El evento número veinticuatro se registró el martes 28 de abril del año 2015 a las 13:56:53 horas, veintitrés kilómetros al noroeste de la localidad de Matías Romero, $17^{\circ}1'48.00''$ de Latitud Norte y $95^{\circ}11'24''$ de Longitud Oeste, este evento presentó una magnitud de 5.5

(Ver **Figura 4.37**). Sus datos espaciales pertenecen a la estación OXPE de la red geodésica TLALOC del UNAVCO. Por su magnitud ocupa la posición número doce en este trabajo.

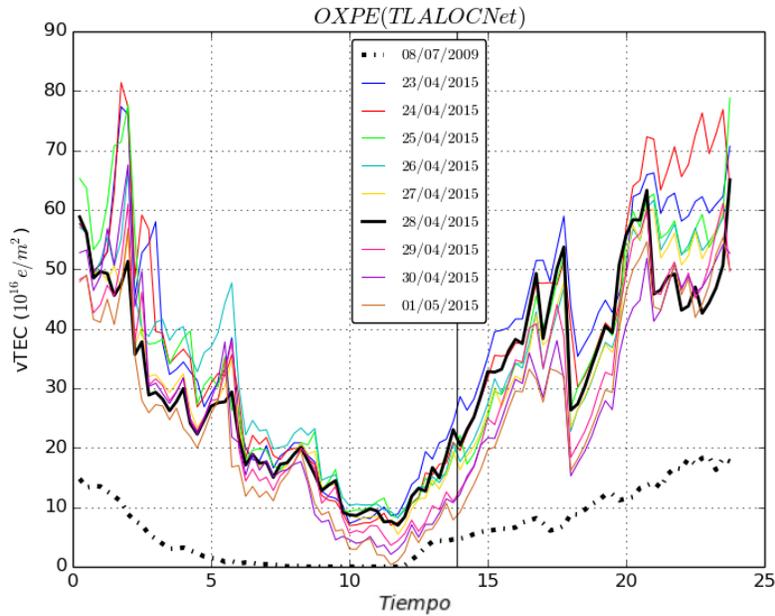


Figura 4.37: Evento sísmico número veinticuatro. En línea más gruesa el día del evento, en punteada el día del año 2009 y vertical la hora del sismo.

Tabla 4.25: Registros máximos de VTEC del evento número veinticuatro.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	77.34	81.4	78.82	66.62	61.86	65.04	61.07	67.54	56.96

En la **Tabla 4.25** se observan los registros máximos de VTEC para los días que conforman este evento. El máximo corresponde a cuatro días antes del sismo con 81.4 uTEC y el mínimo máximo a tres días después del sismo con 56.96 uTEC. Las pérdidas y ganancias de VTEC se hacen presentes y visibles entre los máximos de este evento, sin registrarse un aumento continuo de VTEC. En la **Figura 4.37** a partir del quinto día antes del sismo y hasta tres días antes, los máximos de VTEC, para estos días, ocurren (horas antes de la hora del sismo). En relación al día base la diferencia es notoria, los niveles de VTEC para este evento son altos.

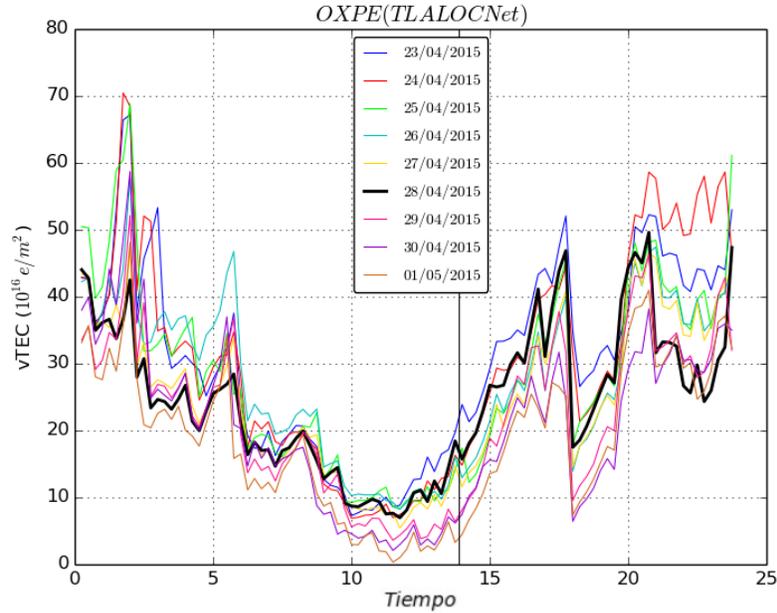


Figura 4.38: Evento sísmico número veinticuatro. Comportamiento del VTEC sin considerar la variación diurna.

En los resultados sin considerar la variación diurna lo primero a analizar es un registro inusual ocurrido a primeras horas del día correspondiente a dos días antes del sismo, este registro inusual de vTEC, dos días antes, se registra también en el evento número veinte (línea azul claro). Los máximos de vTEC registrados días antes del sismo se presentan horas antes de la hora del sismo (Ver **Figura 4.38**). Sin considerar la variación diurna el máximo vTEC registrado corresponde a cuatro días antes del sismo con 70.46 uTEC y el mínimo máximo a un día antes del sismo con 47.13 uTEC. De dos días antes del sismo a un día antes una considerable pérdida de 10.65 uTEC tuvo lugar.

Tabla 4.26: Registros máximos de VTEC del evento número veinticuatro sin considerar la variación diurna.

Día	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
uTEC	67.19	70.46	68.83	57.78	47.13	49.62	52.13	58.7	48.12

El índice geomagnético D_{st} de este evento solo muestra actividad relevante a finales de un día antes del sismo y a comienzos del día del sismo, sin embargo su duración es de

pocas horas (Ver **Figura 4.39**). Estos días activos, un día antes y el día del sismo, no representan los valores más altos de VTEC de los días en estudio. En los resultados sin considerar la variación diurna estos días fueron los que menor VTEC registraron (< 50 uTEC). Los demás días no presentan un índice geomagnético D_{st} sobresaliente.

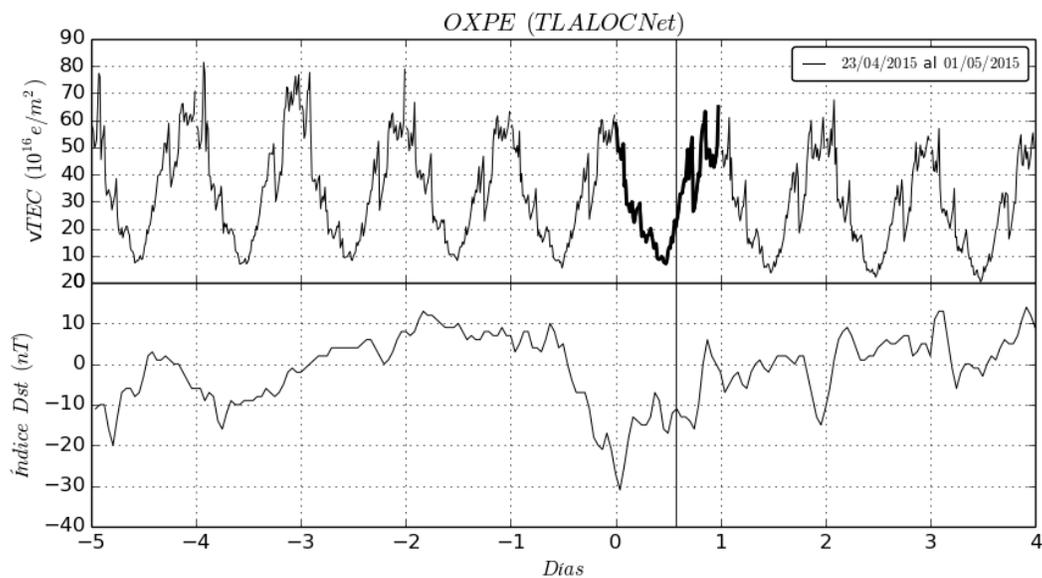


Figura 4.39: VTEC e índice geomagnético D_{st} del evento sísmico número veinticuatro por días. En línea más gruesa el día del evento y vertical la hora del sismo.

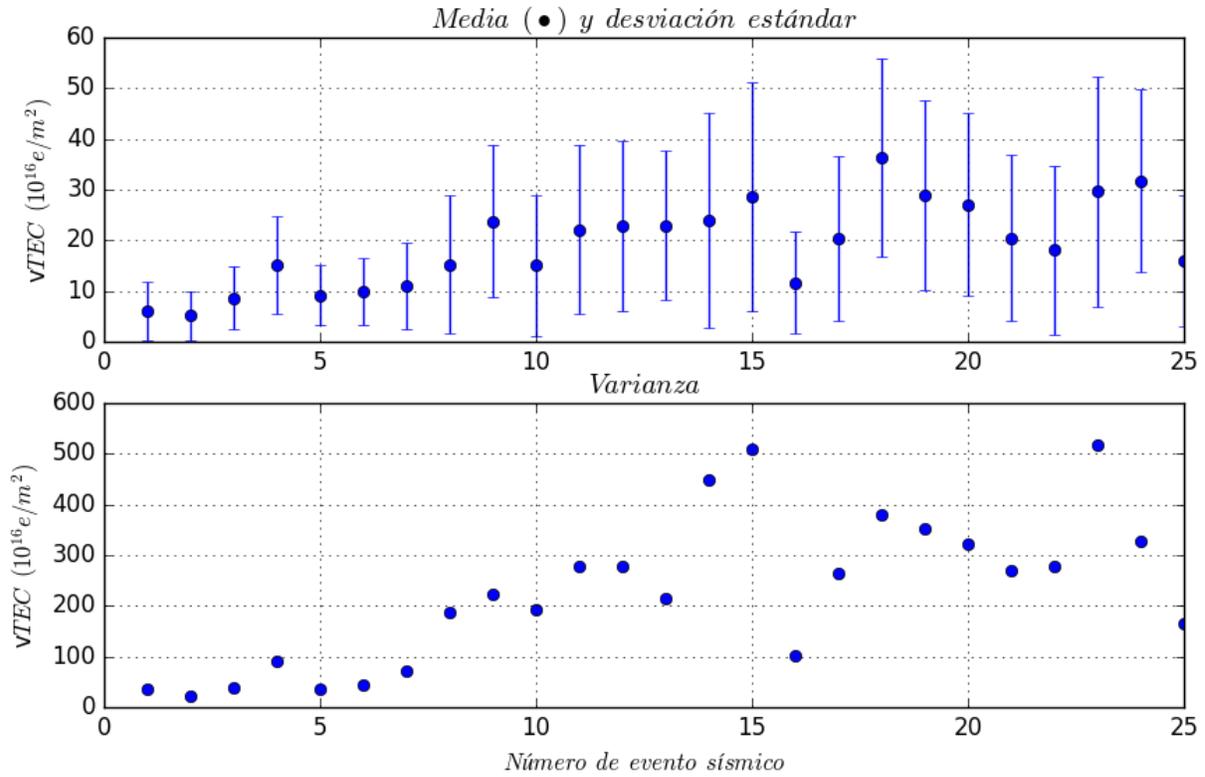


Figura 4.40: Media, desviación estándar y varianza del VTEC del conjunto de eventos en estudio.

En la **Figura 4.40** se muestran las estadísticas aplicadas a los eventos en estudio. Donde el eje de las X corresponde al número de evento (del uno al veinticinco). Los años 2012 y 2014 representan dos cosas: uno, son los años que más eventos sísmicos de magnitud ≥ 5.1 registraron, y dos, representan a la mayoría de los eventos superiores a la media y con mayor varianza.

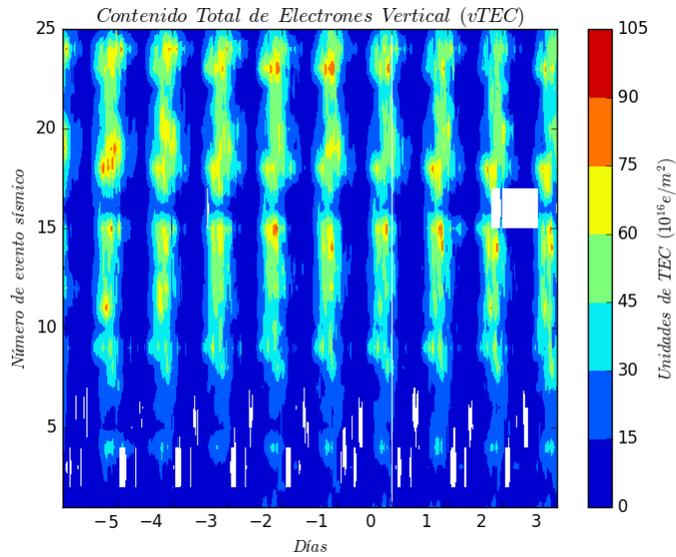


Figura 4.41: Mapa del VTEC del conjunto de eventos en estudio. El eje de las X representa el rango de días en estudio y el eje de las Y el evento sísmico.

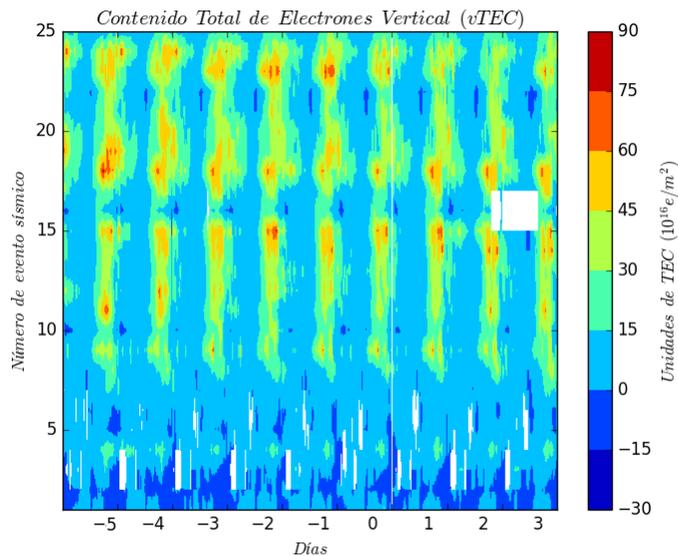


Figura 4.42: Mapa del VTEC del conjunto de eventos en estudio sin considerar la variación diurna. El eje de las X representa el rango de días en estudio y el eje de las Y el evento sísmico.

Los espacios en blanco de las **Figuras 4.41 y 4.42** evidencian aquellos eventos faltos de información. Estas figuras nos permiten observar fácilmente aquellos eventos que tuvieron un alto registro de VTEC durante el rango de días en estudio. Un ejemplo de esto es el caso de los eventos próximos al evento quince e inferiores al evento veinticinco.

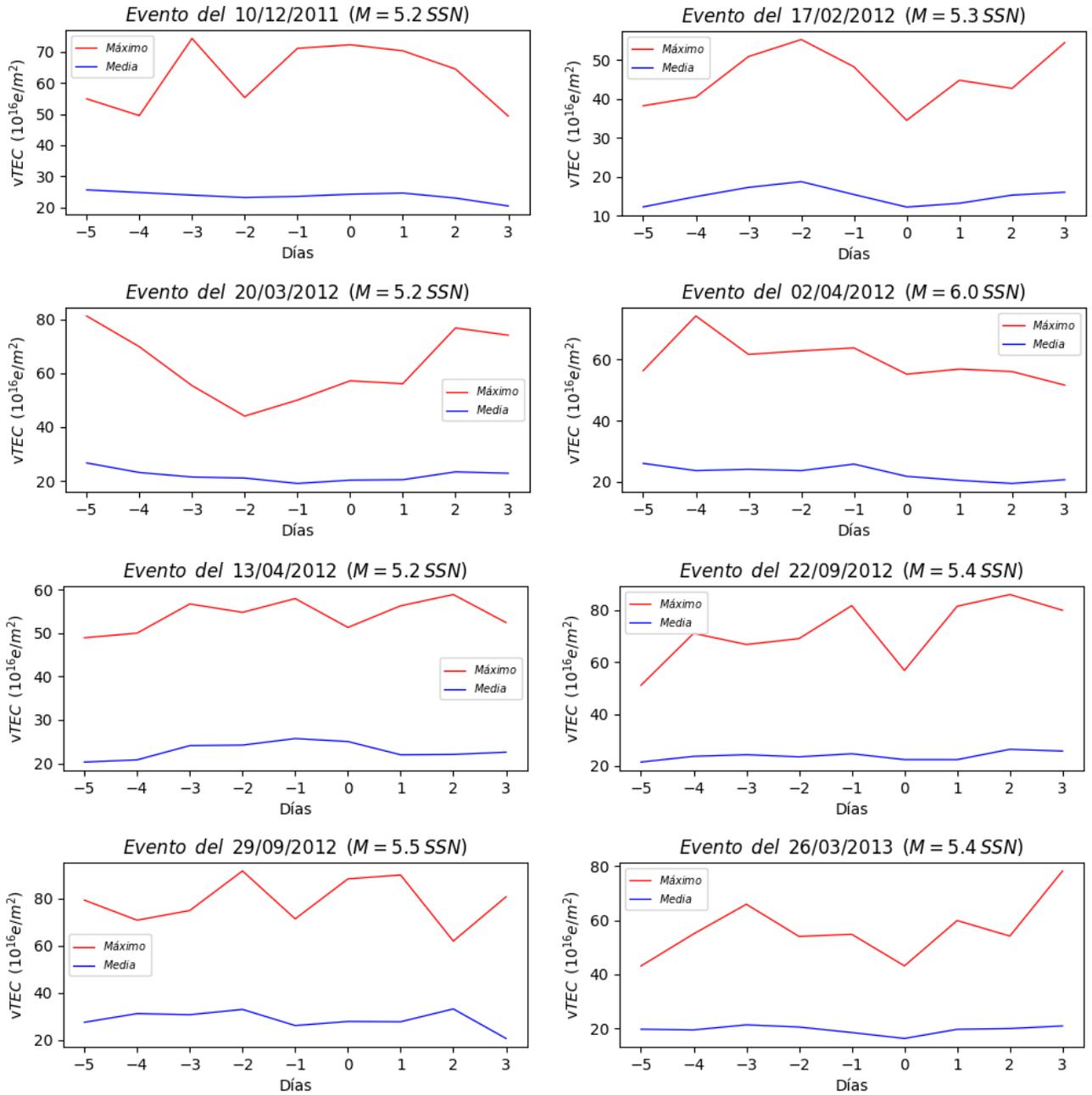


Figura 4.43: Registros máximos de VTEC (en rojo) por día en conjunto con su media (en azul).

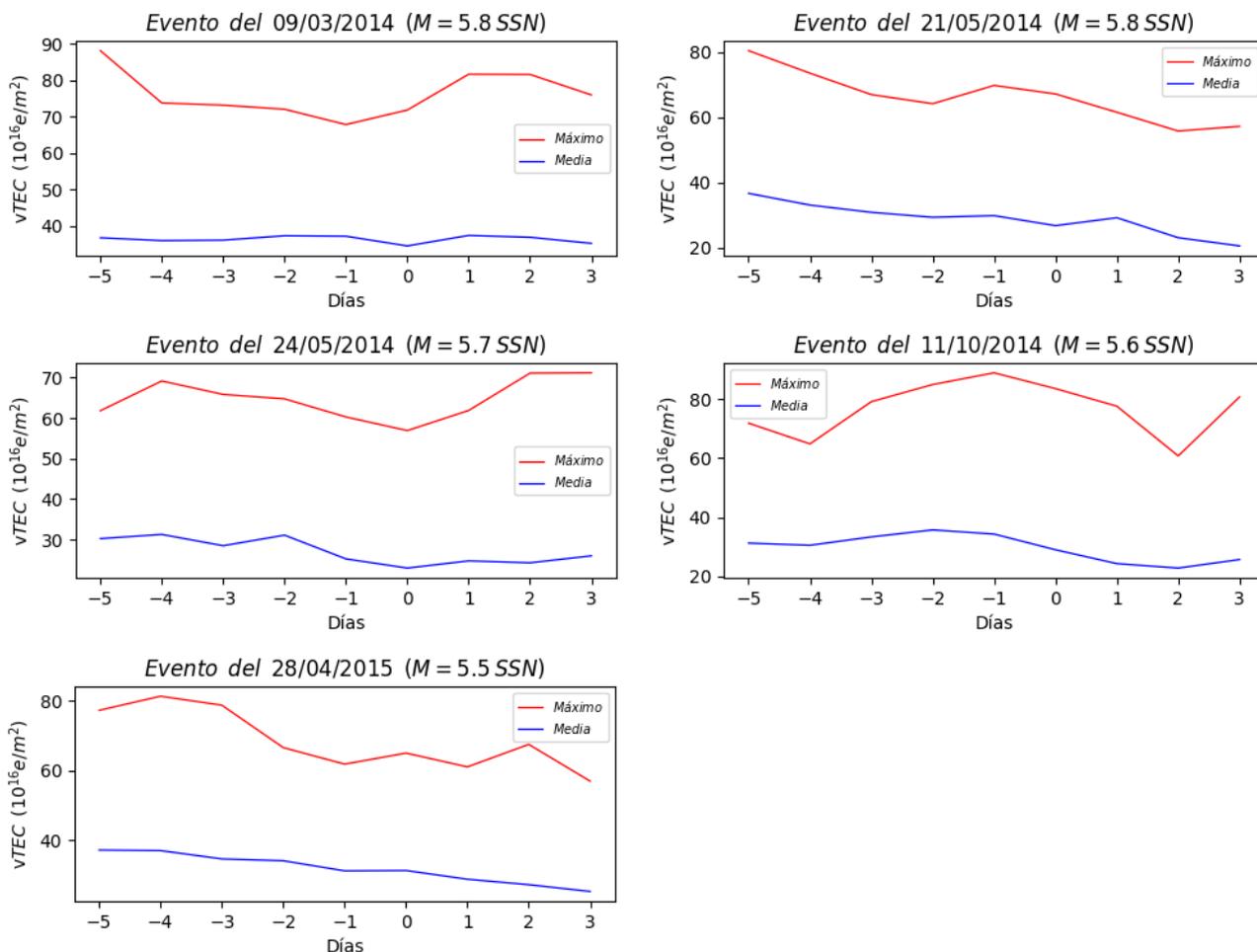


Figura 4.44: Registros máximos de VTEC (en rojo) por día en conjunto con su media (en azul).

En las **Figuras 4.44 y 4.43** es posible observar los registros máximos de VTEC obtenidos para cada uno de los días en estudio en conjunto con la media obtenida para respectivo día. De lo anterior, es posible observar que los registros máximos de los eventos superan considerablemente a su media. Además, de los trece eventos graficados en esta modalidad, diez eventos presentan máximos que superan las 70 uTEC registrados en su mayoría días antes de que se presente el choque sísmico.

Capítulo 5

Conclusiones

En conclusión, cada uno de los eventos estudiados presentó características únicas, tanto sísmicas (magnitud, hora de registro) como en su TEC (niveles y comportamiento de VTEC). Es importante recordar que este estudio consideró únicamente el índice geomagnético *Dst* para descartar posibles afectaciones solares en los registros de VTEC estudiados, ya que, el Sol, al producir ionización en la ionosfera, puede afectar los niveles eléctricos de esta capa de la atmósfera, lo cual se reflejaría en su Contenido Total de Electrones. Por lo tanto, si consideramos el promedio de VTEC registrado el día 08 de julio del año 2009, día considerado como un registro de VTEC sin actividad solar sobresaliente, este no alcanza las 10 uTEC. Lo que significaría que el 64 % de los eventos en estudio registró valores de VTEC por encima del promedio considerado. Además, el 52 % de los eventos muestran registros que doblan el promedio de VTEC considerado. En relación a los niveles de VTEC, en el mejor de los casos, un incremento continuo se registró a partir de tres días antes del choque sísmico. Sin embargo, la interpretación de los registros de VTEC resultantes sugiere que los eventos en estudio presentan anomalías en su VTEC de una forma variada y en relación a la cantidad de uTEC. Es decir, no todos los registros de los días anteriores a un evento sísmico siguen un patrón fijo ya que se observaron decrementos seguidos de incrementos o de la forma inversa. Lo anterior dificulta definir con exactitud a partir de cuántos días antes del choque sísmico es posible observar anomalías, en forma de incrementos y/o decrementos, en el TEC para los eventos en estudio. De forma específica, la hora de registro para ciertos eventos sísmicos estuvo rodeada de picos (es decir, registros altos) de VTEC e incluso, en algunos casos, la hora del sismo coincidió con los registros máximos de VTEC de ciertos días. También se observó que algunas ganancias y pérdidas de VTEC para algunos casos son equivalentes, variando en días. En otros eventos la relación entre el VTEC registrado y el índice geomagnético seleccionado es evidente, con esto

nos referimos a los eventos que presentan, en el mismo período de tiempo, actividad geomagnética alta (< -20 nT) y niveles de VTEC altos (> 70 uTEC), es decir, una relación entre la actividad solar, representada por el índice geomagnético Dst en este estudio, y los niveles de VTEC registrados. Un caso único, en relación a su actividad geomagnética, fue el evento veinticinco, esto debido a que registró la mayor actividad geomagnética de este estudio (índice geomagnético D_{st} de -200 nT) y sin embargo, sus registros de VTEC permanecieron inferiores a las 60 uTEC. Por otra parte, ciertos eventos presentaron valores altos de VTEC sin que existiera actividad geomagnética alta, por lo tanto, en este estudio el índice geomagnético D_{st} se utilizó como filtro para detectar aquellos registros de VTEC relacionados con actividad geomagnética alta. Sin embargo, es preciso recordar que a pesar de que la actividad solar influye de forma directa en el comportamiento de la ionosfera existen otros fenómenos físicos que pueden afectar su comportamiento, tales como: la redistribución de las cargas eléctricas en la superficie de la Tierra, la penetración directa de campos electromagnéticos, entre otros. En relación a los años estudiados, el año 2011 y 2014 registraron la mayor cantidad de eventos sísmicos de magnitudes 5.7 y 5.8. Los años 2012 y 2014 fueron los más activos sísmicamente durante el período de años en estudio (de $M \geq 5.1$). En relación a la ubicación de los sismos registrados durante el período de tiempo en estudio, estos se registraron principalmente en la zona central del Sur y al Suroeste de Oaxaca, en las costas. Por último, es necesario tener en cuenta que la ionosfera tiene un comportamiento complicado incluso bajo condiciones geomagnéticas silenciosas y los parámetros medidos a veces muestran variaciones en condiciones sísmicas inexistentes que pueden asociarse a otros factores desconocidos. En este sentido, se demostró que para algunos eventos sísmicos, de magnitudes ≥ 5.1 , registrados en el estado de Oaxaca, México durante el período de años 2008 - 2015, existen anomalías en su VTEC los días previos a un sismo.

Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunas líneas de investigación que se encuentran en espera de ser atendidas a futuro por el autor y/o por investigadores relacionados al tema abordado. Por eso, esta sección pretende introducir el trabajo futuro que es posible realizar para seguir avanzando en la búsqueda, conocimiento y definición de precursores sísmicos en el estado de la ionosfera. Estas líneas pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Es necesario tomar en cuenta que al trabajar con datos espaciales el ruido en los mismos puede estar presente. Por lo tanto, es recomendable aplicar metodologías de análisis de señales a los datos crudos de TEC.
- Al tratarse de precursores sísmicos es conveniente aumentar el rango de días previos a un evento sísmico.

- El estudio de los datos de VTEC obtenidos durante el desarrollo de este trabajo puede permitir la validación del desarrollo de un sistema de simulación y predicción de VTEC.
- Aplicar análisis estadísticos, como regresión lineal, a los datos de VTEC e índice geomagnético. Lo anterior, con la finalidad de identificar de forma concisa que tipo de relación existe entre dichas variables.
- Llevar a cabo distintas metodologías de análisis a los datos crudos de VTEC con la finalidad de identificar la más idónea a la hora de identificar y definir un precursor sísmico con base al estado de la ionosfera.

Referencias bibliográficas

- Afonin, V. V., Molchanov, O. A., Kodama, T., Hayakawa, M., y Akentieva, O. A. (1999). Statistical study of ionospheric plasma response to seismic activity: Search for reliable result from Satellite Observations. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*.
- Akhoondzadeh, M. (2013). Genetic algorithm for TEC seismo-ionospheric anomalies detection around the time of the Solomon (Mw = 8.0) earthquake of 06 February 2013. *Advances in Space Research*, 52(4):581 – 590.
- Akhoondzadeh, M. y Saradjian, M. (2011). TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes. *Advances in Space Research*, 47(1):94 – 104.
- Anderson, J. D. y Fuller-Rowel, T. J. (1999). The Ionosphere. *Space Environment Topics*, 14.
- Astiz, L. y Kanamori, H. (1984). An earthquake doublet in ometepec, guerrero, mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 34(1–2):24 – 45.
- Bošková, J., Šmilauer, J., Tríska, P., y Kudela, K. (1994). Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the intercosmos 24 satellite prior to the iranian earthquake of 20 june 1990. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 38(2):213–220.
- Camargo, P. O. (1999). Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência. *Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná*, page 191.
- Carrano, C. S., Anghel, A., Quinn, R. A., y Groves, K. M. (2009). Kalman filter estimation of plasmaspheric total electron content using GPS. *Radio Science*, 44.

- Chael, E. P. y Stewart, G. S. (1982). Recent large earthquakes along the middle american trench and their implications for the subduction process. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B1):329–338.
- Cherniak, I., Zakharenkova, I., y Krankowski, A. (2014). Approaches for modeling ionosphere irregularities based on the tec rate index. *Earth, Planets and Space*, 66(1):165.
- Chmyrev, V. M., Isaev, N. V., Serebryakova, O. N., Sorokin, V. M., y Sobolev, Y. P. (1997). Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over and earthquake region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59(9).
- Enomoto, Y. y Hashimoto, H. (1990). Emission of charged particles from indentation fracture of rocks. *Nature*, 346:641.
- Enomoto, Y. y Hashimoto, H. (1992). Transient electrical activity accompanying rock under indentation loading. *Tectonophysics*, 211(1–4):337 – 344.
- Erickson, W. C., Perley, R. A., Flatters, C., y Kassim, N. E. (2001). Ionospheric corrections for vla observations using local gps data. *A and A*, 366(3):1071–1080.
- Ezquer, R. G. y Radicella, S. M. (2008). Ionosfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán. *Física de la Tierra*, 20:61–81.
- Fishkova, L. M., Gokhberg, M. B., y Pilipenko, V. A. (1985). Relationship between night airglow and seismic activity. *Annales Geophysicae*, 3:689–694.
- Freund, F. T. (2003). Rocks that crackle and sparkle and glow - Strange pre-earthquake phenomena. *Journal of Scientific Exploration*, 17(1).
- Galper, A., Koldashov, S., y Voronov, S. (1995). High energy particle flux variations as earthquake predictors. *Advances in Space Research*, 15(11):131 – 134. Natural Hazards: Monitoring and Assessment Using Remote Sensing Technique.
- Hayakawa, M. y Molchanov, O. A. (2002). Seismo-electromagnetics: Lithosphere-atmosphere ionosphere coupling. *Terrapub, Tokyo*.
- Hernández, M., Juan, J., y Sanz, J. (2005). *Procesado de Datos GPS: código y fase. Algoritmos, Técnicas y Recetas*. gAGE/UPC.
- Hobara, Y. y Parrot, M. (2005). Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67:667–685.

- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2008). *GNSS—global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more / Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, Elmar Wasle*. Springer, Springer,, New York .:
- Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, G. (2005). *GPS Posicionamiento satelital*. UNR, Universidad Nacional de Rosario.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., y Sano, Y. (1995). Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan. *Science, New Series*, 269(5220).
- Ikeya, M. (2004). *Earthquakes and Animals: From Folk Legends to Science*. World Scientific.
- Jiménez, Z. (1977). Mecanismo focal de siete temblores ($M_b > 6.5$) ocurridos en la región de Orizaba, México, en el período de 1928 a 1973. *Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UNAM*.
- Jiménez, Z. y Ponce, L. (1979). Focal mechanism of six large earthquakes in northern Oaxaca, for the period 1928-1973. *Geofís. Int. Special Issue on Oaxaca Earthquake, November 29, 1978*, 17(3):379–386.
- Kirschvink, J. L. (2000). Earthquake Prediction by Animals: Evolution and Sensory Perception. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2).
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., y Tsai, H. F. (2001). Variations of ionospheric total electron content during the chi-chi earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28(7):1383–1386.
- Mancini, F., Galeandro, A., Giglio, M. D., y Barbarella, M. (2015). Ionospheric activity and possible connection with seismicity: Contribution from the analysis of long time series of GNSS signals. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 85–86:106 – 113. Earthquakes Precursors and Earthquake Prediction: Recent Advances.
- Mayaud, P. N. (1980). *Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices / P. N. Mayaud*. American Geophysical Union Washington.
- Molchanov, O. A. y Hayakawa, M. (1998). Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A8):17489–17504.

- Molchanov, O. A., Hayakawa, M., y Rafalsky, V. A. (1995). Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 100(A2):1691–1712.
- Montes, R. L. (2010). Cálculo del Contenido Total de Electrones TEC en la ionosfera sobre diversas estaciones mexicanas de GPS y su relación con el clima espacial asociado a ráfagas intensas de rayos X. *Tesis de Maestría, UNAM*, 17.
- Núñez-Cornú, F. (1983). Sismotectónica del estado de Oaxaca, México, basada en el análisis de temblores fuertes ($M_s > 7.0$). *Tesis de Maestría, Fac. de Ciencias, UNAM*.
- Núñez-Cornú, F. y Ponce, L. (1989). Zonas sísmicas de Oaxaca, México: Sismos máximos y tiempos de recurrencia para el período 1542-1988. *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, 28(4):587–641.
- Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration and United States Air Force, N. (1976). U.S. Standard Atmosphere 1976.
- Otsuka, Y., Kotake, N., Tsugawa, T., Shiokawa, K., Ogawa, T., Effendy, Saito, S., Kawamura, M., Maruyama, T., Hemmakorn, N., y Komolmis, T. (2006). GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake. *Earth Planets Space*, 58:159–165.
- Palacios, J. C., Olarte, C., Granados, C., Devia, A., y Villalobos, J. (2006). Monitoreo de la Ionosfera Colombiana por medio de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). *Revista Colombiana de Física*, 38(4).
- Pierce, E. T. (1976). Atmospheric electricity and earthquake prediction. *Geophysical Research Letters*, 3(3):185–188.
- Pulinets, S. (2004). Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications. *TAO*, 15(3).
- Pulinets, S. y Davidenko, D. (2014). Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit. *Advances in Space Research*, 53(5):709 – 723.
- Pulinets, S., Legen'ka, A., Gaivoronskaya, T., y Depuev, V. (2003). Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(16–18):1337 – 1347.

- Pulinets, S. A. y Boyarchuk, K. A. (2004). *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Springer.
- Pulinets, S. A., Contreras, A. L., Bisiacchi-Giraldi, G., y Ciruolo, L. (2005). Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003. *Geofísica Internacional*, 44(4):369–377.
- Rastogi, B., Chadha, R., y Raju, I. (1986). Seismicity near Bhatsa reservoir, Maharashtra, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44(2):179 – 199.
- Rastogi, B., Rao, C. R., Chadha, R., y Gupta, H. (1987). Precursory phenomena in the microearthquake sequence near the osmansagar reservoir, hyderabad, india. *Tectonophysics*, 138(1):17 – 24. Earthquake Prediction.
- Richon, P., Klinger, Y., Tapponnier, P., Li, C. X., Woerd, J. V. D., y Perrier, F. (2010). Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. *Radiation Measurements*, 45:211–218.
- Richon, P., Sabroux, J. C., Halbwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J., y Punongbayan, R. (2003). Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophysical Research Letters*, 30(9):34–4.
- Rodrigues, C. y Camargo, P. (2007). Potencial GPS en el estudio de la deriva vertical del plasma de la Ionosfera a partir de las señales en la banda L. *Conference Paper*.
- Romanovskaya, Y. V., Namgaladze, A. A., Zolotov, O. V., Starikova, N. A., y Lopatyy, V. Z. (2012). Searching for seismo-ionospheric earthquakes precursors: Total electron content disturbances before 2005-2006 seismic events. *Proceedings of the MSTU*, 15(2):477–481.
- Ruzhin, Y. Y. y Larkina, V. A. (1996). Magnetic conjugation and time coherency of seismoionospheric VLF bursts and energetic particles. *Proceedings of International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility, Wrocław*, pages 645–648.
- Sardón, E., Rius, A., y Zarraoa, N. (1993). Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del sistema de posicionamiento global. *Física de la Tierra*, (5):167–182.
- Schunk, R. W. y Nagy, A. F. (2000). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge, Cambridge, 1 edition.

- Sharma, A. y Verma, S. R. (2013). Solar activity during the rising phase of solar cycle 24. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 3(3):5.
- Singh, S. K., Astiz, L., y Haskov, J. (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: a reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71:827–843.
- Singh, S. K., Suárez, G., y Domínguez, T. (1985). The Oaxaca, Mexico earthquake of 1931: lithospheric normal faulting in the subducted Cocos plate. *Nature*, 317:56–58.
- Tariku, Y. A. (2015). Patterns of gps-tec variation over low-latitude regions (african sector) during the deep solar minimum (2008 to 2009) and solar maximum (2012 to 2013) phases. *Earth, Planets and Space*, 67(1):35.
- Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., Nishioka, M., Maruyama, T., Kato, H., Nagatsuma, T., y Murata, K. T. (2011). Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63(7):66.
- Wadatsumi, K. (1995). Precursory Quake Information 1519 prior to Hanshin Earthquake. *Tokyo Pub.*
- Xu, T., Hu, Y., Zhang, H., Chen, Z., Wu, J., y Xu, Z. (2012). Ionospheric disturbances on 8 september, 2010: Was it connected with the incoming moderate chongqing earthquake? *Advances in Space Research*, 50(2):205 – 210.
- Zakharenkova, I. E. y Shagimuratov, I. I. (2009). Using of global and regional ionospheric maps to study of the pre-seismic ionosphere modification. *The Institution of Engineering and Technology 11th International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009)*.
- Zakharenkova, I. E., Shagimuratov, I. I., y Tepenitsyna, N. Y. (2016). GPS TEC Anomalies Observed Prior to the Peru Earthquake of 26 September 2005.
- Zaslavski, Y., Parrot, M., y Blanc, E. (1998). Analysis of TEC measurements above active seismic regions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105(3–4):219 – 228.
- Zhao, B., Wang, M., Yu, T., Wan, W., Lei, J., Liu, L., y Ning, B. (2008). Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great wenchuan earthquake? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A11):n/a–n/a. A11304.

Zolesi, B. y Cander, L. R. (2014). *Ionospheric Prediction and Forecasting*. Springer Geophysics.