ANOMALÍAS IONOSFÉRICAS LOCALES PREVIA OCURRENCIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS LA VEGA, 2012 Y MESETA DE LOS SANTOS, 2015

Camilo Andrés Corredor Roa

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA
BOGOTÁ D.C., FEBRERO DE 2016

ANOMALÍAS IONOSFÉRICAS LOCALES PREVIA OCURRENCIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS LA VEGA, 2012 Y MESETA DE LOS SANTOS, 2015

Camilo Andrés Corredor Roa

Proyecto de Grado para optar al título de:
Ingeniero Catastral y Geodesta

Director: Msc Andrés Cárdenas Contreras.
Msc. en Ciencias - Geofísica

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA
BOGOTÁ D.C., FEBRERO DE 2016

Índice general

1. Preliminares **2**
1.1. Introducción 2
1.2. Objetivos 4
1.2.1. Objetivo General 4
1.2.2. Objetivos Específicos 4
1.3. Estado Actual 4
1.4. Planteamiento del Problema 5
1.5. Alcances 6

2. La Atmósfera Terrestre **7**
2.1. La Ionosfera 9
2.1.1. Estructura Ionosférica 12
2.1.2. Fuente y Absorción de Radiación Solar 14
2.2. Propagación de Señales Electromagnéticas a través de la Ionosfera 18

3. La Transformada de Wavelet **24**
3.1. Transformada de Fourier 25
3.2. Transformada Discreta de Fourier 26
3.3. Transformada Corta de Fourier 27
3.4. Transformada Continua de Wavelet 28
3.5. Transformada Discreta de Wavelet (TDW) 30
3.5.1. Análisis Multiresolución (MRA) 32
3.5.2. Momentos de Desvanecimiento 34
3.5.3. Filtro de un nivel: Algoritmo de Mallat 34
3.5.4. Familia de Funciones Wavelet 34

4. Datos y Métodos **38**
4.1. Zona de Estudio 38
4.2. Insumos 40
4.2.1. Datos GNSS 41
4.2.2. Software 43
4.3. Metodología 45

4.3.1. Definición de casos de estudio 46
4.3.2. Procesamiento de archivos RINEX 47
4.3.3. Discriminación de valores VTEC en función del ángulo cenital . . . 49
4.3.4. Selección de la función Wavelet Madre 50
4.3.5. Aplicación de la Wavelet Madre, Generación de reportes estadísticos 51
4.4. Análisis Espacial 51
4.4.1. Construcción de mapas VTEC 51

5. Resultados y Discusiones 53
5.1. Preprocesamiento de las Series de Tiempo 53
5.2. Procesamiento de las Series de Tiempo 59
5.3. La Vega, Cauca 64
5.3.1. Estación PSTO 65
5.3.2. Estación POPA 69
5.3.3. Análisis Espacial I 73
5.4. Los Santos, Santander 77
5.4.1. Estación BEJA 77
5.4.2. Estación BNGA 80
5.4.3. Estación PAMP 81
5.4.4. Análisis Espacial II 85

6. Conclusiones 91

7. Recomendaciones 93

Índice de Tablas

2.1. Descripción de las variables de la Ecu. 2.16 21
2.2. Descripción de las variables de la Ecu. 2.25 22

4.1. Características del evento sísmico. La Vega, Cauca 38
4.2. Características del evento sísmico. Meseta de los Santos, Santander 39
4.3. Coordenadas geográficas seleccionadas para el estudio de caso, La Vega, Cauca . 43
4.4. Coordenadas geográficas seleccionadas para el estudio de caso, Los Santos, Santander 43
4.5. Descripción de los elementos de la cabera del fichero RINEX de observación . . 48
4.6. Descripción de los elementos de la cabera del fichero RINEX de navegación . . . 49

5.1. Resumen del experimento para la selección de la función Wavelet madre. 63
5.2. Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 259, 260, 261 y 262 . 65
5.3. Coeficiente de variación Estación PSTO 266 en el intervalo $[0^h, 11^h]$ 66
5.4. Coeficiente de variación Estación PSTO 266 en el intervalo $[12^h, 23^h]$ 66
5.5. Coeficiente de variación Estación PSTO 267 en el intervalo $[3^h, 11^h]$ 67
5.6. Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 271, 272, 273, 274 y 275 68
5.7. Coeficiente de variación Estación POPA 266 en el intervalo $[0^h, 11^h]$ 70
5.8. Coeficiente de variación Estación POPA 266 en el intervalo $[12^h, 23^h]$ 70
5.9. Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 267, 268, 269 y 270 . 71
5.10. Coeficiente de Variación para el día 067 y 068 en el intervalo $[0^h$ y $10^h]$ 81
5.11. Coeficiente de Variación de la Estación PAMP para el día 054 y 055 en el intervalo $[0^h$ y $10^h]$ 83
5.12. Características del evento sísmico. Umuquena, Tachira 84

Índice de Figuras

2.1. Gradiente de temperatura atmosférico. [Palacios, 2010] 9
2.2. Modelo resumen del experimento llevado a cabo por *Marconi*. Reflexión de ondas electromagnéticas. 11
2.3. Comportamiento del ambiente ionosférico 13
2.4. Variación diurna y nocturna de la subregión F. [Cipagauta, 2007] 15
2.5. Forma geométrica de la emisión del viento solar [Ruiz, 2014] 16
2.6. Ángulo cenital solar χ. Modificado de [Shunck y Nagy, 2009] 17
2.7. Propagación de ondas electromagnéticas por trayectorias alternas debido al medio ionosférico. Modificado de: [Mohino Harris, 2005] 19
2.8. Representación geométrica del Contenido Total de Electrones Vertical. Modificado de: [Schaer, 1999] 23

3.1. Esquema de aplicación de la transformada de Fourier. [Acevedo Martinez, 2009] 26
3.2. Transformada corta de Fourier, ventana de análisis. [Begoña, 2009] 28
3.3. Sinusoide con perturbaciones en $t = 0{,}7$ y $t = 1{,}3$ [Goswani y Chan, 2012] 29
3.4. Esquema de la transformada de Wavelet [Acevedo Martinez, 2009] 29
3.5. Representación de la transformada de Wavelet 31
3.6. Esquema aplicación de transformada de Wavelet. Modificado de [Acevedo Martinez, 2009] 35
3.7. Wavelet madre de *haar* 36
3.8. Wavelet madre *Daubechies 4* 36
3.9. Wavelet madre *Symmlets 4* 37
3.10. Wavelet madre *Coiflets 1* 37

4.1. Ubicación geográfica de sismos objeto de estudio 39
4.2. Esquema de estructura geológica del Nido de Bucaramanga 41
4.3. Estaciones analizadas en los casos de estudio 42
4.4. Metodología desarrollada. 45
4.5. Mapa de actividad sísmica y fallas geológicas en Colombia 46
4.6. Fichero RINEX de observación de la estación BERR del día 054 de 2015 48

5.1. Fichero VTEC, Estación Pamplona (PAMP 054) 54
5.2. Contenido Total de Electrones Vertical. Estación Pamplona (PAMP 054) 54

5.3. Estación POPA 269 y PSTO 288 55
5.4. Estación PAMP 054 y BEJA 063 56
5.5. Fichero VTEC, Estación Pamplona (PAMP 054). Época de Observación 58
5.6. Comparativo VTEC BNGA 064 y Media móvil BNGA 064 58
5.7. Comparativo VTEC FLOR 260 y Media móvil FLOR 260 59
5.8. Comparativo energía de la señal frente a energía conservada 61
5.9. Análisis correspondiente a la selección de la función Wavelet madre 62
5.10. Diagrama de barras. Selección de la función Wavelet madre. 64
5.11. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO 66
5.12. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO 67
5.13. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO 68
5.14. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA 70
5.15. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA 71
5.16. Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA 72
5.17. Comportamiento ionosférico día 259 19^h - 20^h 73
5.18. Comportamiento ionosférico día 259 20^h - 21^h 74
5.19. Fenómeno VTEC día 266 19^h y 20^h 75
5.20. Fenómeno VTEC día 268 19^h y 20^h 75
5.21. Comportamiento VTEC 271, 273 y 274 [20^h y 21^h] 76
5.22. Comportamiento VTEC, día 287 [19^h y 20^h] 76
5.23. BEJA 068. Comportamiento VTEC 78
5.24. Comparativo de estacionalidad diaria. Día 066 y 067 frente a día 068 78
5.25. Comparativo de estacionalidad diaria. Día 064 y 065 frente a día 068. 79
5.26. Comportamiento VTEC anterior y posterior al evento sísmico 80
5.27. Comparación del comportamiento Estación BNGA 82
5.28. Análisis comparativo de la variable VTEC de la Estacion BNGA. 83
5.29. Comportamiento VTEC Estación PAMP 054, 055 y 056 84
5.30. Estación PAMP 065 a 070 85
5.31. Comportamiento VTEC entre 15^h y 16^h 86
5.32. Comportamiento VTEC entre 18^h y 19^h 87
5.33. Comportamiento VTEC entre 20^h y 21^h 88
5.34. Comportamiento VTEC día previo al evento entre 19^h y 23^h 89
5.35. Comportamiento VTEC entre 22^h y 23^h 90

Capítulo 1

Preliminares

1.1. Introducción

Los cataclismos sísmicos han significado a lo largo de la historia del mundo innumerables perdidas humanas, económicas, apertura de grandes brechas sociales, entre otras problemáticas de toda índole, por lo que la humanidad ha debido reinventarse para superar este tipo de adversidades que podrían afectarnos de nuevo y en cualquier momento sin importar el orden jerárquico social, raza, religión entre muchos aspectos inherentes a las sociedades que habitan el planeta.

No obstante, aún con la posibilidad de predecir la ocurrencia de un terremoto no se elimina totalmente el riesgo de perdidas en cualquier sentido, sin embargo la comunidad científica se encuentra ante un gran desafío sobre el cual debe poner ahínco permitiéndose en el futuro lograr la predicción de este tipo de eventos. Por lo anterior, es necesario buscar nuevos caminos en la conquista de este reto dado que el planeta tierra no actúa independientemente, por el contrario corresponde a una amalgama de complejos componentes que resultan en un gran sistema y que a su vez interacciona constante e ininterrumpidamente con el espacio exterior.

Pero más allá de lograr el utópico planteado se debe trazar un largo camino de investigación geofísica de la alta atmósfera que permita develar comportamientos y fenómenos particulares que tienen lugar en días precedentes a la ocurrencia de eventos sísmicos y de esta forma de cara al futuro evitar parcialmente y en la medida de lo posible las menores afectaciones.

Por lo anterior, a continuación se desarrolla esta investigación de manera experimental y sobre estudios de caso con ocurrencia en Colombia en la segunda década del siglo XXI. Sentido por el cual ha de resaltarse que los registros asociados al nivel de ionización en la alta atmósfera pueden ser estimados a través de los retrasos evidenciados en la señal GNSS (Global Navigation Satellite System); así muchos estudios ionosféricos desarrolla-

dos a través del tiempo y principalmente en altas latitudes muestran que de alguna u otra forma es segmentada la información de la que provienen, principalmente siendo analizado el conjunto de mediciones asociado a cada satélite independientemente de sus similares, dado por la condición misma del sistema que en una época de observación especifica contiene medidas heterogéneas, es decir que para un tiempo t_0 se encuentran en la esfera de observación enésimos satélites emitiendo esta señal y siendo recepcionada en tierra. Entonces, se procura evitar la perdida y/o segmentación de dicha información y homogeneizarla a través de la Transformada de Wavelet que además por sus características está en la capacidad de eliminar el ruido de la señal de manera parcial o total en el mejor de los casos, posibilitando de esta forma la construcción de análisis rigurosos. No menos importante, esta misma herramienta matemática resalta aquellas fluctuaciones inesperadas que pueda presentar la ionosfera y que reflejan aquellas anomalías que posteriormente se traducen en elementos de predicción asociados a la ocurrencia de movimientos telúricos.

De la heterogeneidad de la medición ionosférica mencionada previamente, da lugar a obtener coordenadas de cada valor medido; dado esto, trasciende la posibilidad de construir mapas de interpolación espacial con el fin de observar el comportamiento ionosférico y evidenciar los fenómenos sismogénicos que tienen lugar sobre las zonas de ocurrecia telúrica.

Por lo tanto, se ha estructurado esta tesis así: el capítulo 2 corresponde a una descripción de la atmósfera terrestre, su composición, factores que ionizan la alta atmósfera, por supuesto aquellos que provocan la variabilidad de la misma y que afectan la señal GNSS provocando retrasos mencionados, siendo estos aquellos que permiten calcular la medida ionosférica TEC (Contenido Total de Electrones). Cabe resaltar que por los objetivos perseguidos en esta investigación aspectos tales como el sistema GNSS no son desarrollados a profundidad, únicamente el sustento teórico para la determinación de TEC y VTEC (Contenido Total de Electrones Vertical) por medio de información satelital.

El capítulo 3 está encaminado a mostrar las ventajas que representa hacer uso de la Transformada de Wavelet frente a otras herramientas de análisis matemático como la Transformada de Fourier. En ese mismo sentido, denotar las características de la Trasformada frente a datos de este tipo. Posteriormente, en el capítulo 4 son descritos los casos de estudio desarrollados, información satelital asociados a estos y el software sobre el cual se desarrollaron e implementaron las rutinas para el procesamiento de la información.

En los capítulos 5 y 6 de esta tesis, son expuestos los resultados encontrados y por consiguiente el análisis de los mismos, bajo la primicia de segmentarlos en función de los casos de estudio. Por último se presentan recomendaciones y futuras investigaciones a desarrollar y robustecer esta campo de investigación aún incipiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar la presencia de anomalías ionosféricas a través de datos GNSS en periodos de tiempo previo a la ocurrencia de los eventos sísmicos La Vega, 2012 y Meseta de Los Santos, 2015.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Analizar las series de tiempo VTEC de estacionalidad diaria en los periodos previos, de ocurrencia y posterior a los eventos sísmicos haciendo uso de la Transformada de Wavelet.

2. Construir mapas de VTEC para la determinación espacial de las perturbaciones ionosféricas y su desarrollo en el tiempo.

1.3. Estado Actual

Desde el siglo pasado se han venido desarrollando investigaciones encaminadas a la determinación de parámetros y/o comportamientos particulares tanto de la corteza como de la atmósfera que indique con anterioridad de cualquier magnitud la posibilidad de ocurrencia de eventos sísmicos, así también se busca la predicción de parámetros fundamentales como la magnitud, epicentro y profundidad de estos. Aunque las anomalías de la alta atmósfera representadas en la variación del plasma ionosférico no expresan comportamiento alguno de acuerdo a estas características, retrasos de la señal GNSS que atraviesa el estrato atmosférico si están relacionadas con la ocurrencia de eventos sísmicos a través de la medición de TEC, sin embargo aún se desconoce la proporción de esta relación.

De hecho, experimentos realizados con eventos ocurridos alrededor del planeta indican que aquellos sismos con magnitud mayor a 4,5° en la escala de Ritcher fueron detectados en un 73 %, mientras que eventos con magnitud superior a 6° fueron identificados en un 100 % [Pulinets et al., 2003]. La detección de los terremotos fue realizada con periodos de antelación entre 1 y 11 días a la ocurrencia de los sucesos analizados.

Es motivado por la evidencia encontrada en el análisis de información GNSS en días previos a la ocurrencia de eventos sísmicos tales como Sumatra – 2004, 2007 [Theerapatpaiboon et al., 2005, Jusoh et al., 2008], Northridge – 1994 [Calais y Minster, 1998], entre decenas de movimientos telúricos ocurridos en el planeta, el planteamiento de varias hipótesis que intentan explicar la aparición de anomalías ionosféricas con anterioridad a la ocurrencia de eventos sísmicos, entre las que se encuentran cálculos teóricos de la

permeabilidad de la ionosfera a cambios en la densidad del plasma por factores cuya fuente se sugiere provenga del interior de la corteza terrestre. En primer lugar se destaca la volatilidad de la ionosfera que es provocada principalmente por actividad solar; sin embargo, precedente a terremotos se presupone una liberación de radón desde el interior de la corteza terrestre que humecta el estrato atmosférico [Pulinets et al., 2003] y acrecienta el retraso de la señal electromagnética emitida desde el segmento espacial del sistema que se evidencia en el aumento de los niveles del Contenido Total de Electrones. Refiere también a sucesos sismogénicos, anomalías en el campo eléctrico que recubre el planeta, penetrando al interior de la ionosfera y provocando la excitación y deriva de electrones cargados e iones que de la misma forma se evidencia en la anomalía del TEC en la zona presísmica [Zou y Zhao, 2010]. De otra parte, se sospecha que del interior de la corteza se originan ondas acústicas y gravitatorias en días previos al acontecimiento telúrico que conlleva a las irregularidades ionosféricas [Dabas et al., 2007]. Y por último, se asocian también a fenómenos del campo electromagnético terrestre. Sin embargo, la discusión esta abierta ante las hipótesis mencionadas dado que, por ejemplo la medición de elementos químicos u ondas de cualquier tipo que probablemente se emanan desde el interior de la corteza se presentan como desafío para la comunidad científica por la misma aletoriedad de ocurrencia de los movimientos telúricos y no permitiendo el desarrollo del análisis correspondiente; de otra parte, la medición en la alta atmósfera y de los diversos componentes que pudiesen afectar la ionosfera es aún más complejo por las condiciones de esta.

1.4. Planteamiento del Problema

La detección temprana de terremotos representa para la investigación sísmica y de la alta atmósfera un reto de magna proporción y que a pesar de las grandes esfuerzos investigativos llevados a cabo principalmente en altas latitudes, aún el hecho de predecir alguno de los elementos de este tipo de fenómenos no es posible y de ningún modo tampoco lo es para la definición de la zona afectada.

Por lo tanto, esta investigación pretende aportar elementos que contribuyan a la detección temprana de estos eventos a través del análisis y procesamiento de señales GNSS que son recepcionadas en tierra por redes de estaciones de rastreo continuo, más exactamente para el caso de Colombia la red MAGNA - ECO; en relación a ello surge naturalmente un cuestionamiento que se procura responder: ¿Cuál es la relación existente entre los retrasos de la señal GNSS con la aparición de anomalías ionosféricas locales previa ocurrencia de eventos sísmicos?

Responder a esta pregunta requiere del desarrollo de análisis sobre casos de estudio que tuvieron lugar en el país en la segunda década del siglo XXI cuyas magnitudes corresponden a las más altas registradas en este periodo de tiempo. Como se mencionó previamente,

el desarrollo de este tipo de investigaciones han tenido lugar hacía altas latitudes, no obstante para la zona ecuatorial el nivel investigativo aún es incipiente, por lo que se pretende en primera instancia evidenciar los posibles comportamientos anómalos en la región como causa de la ocurrencia de eventos sísmicos y como segunda medida el planteamiento e implementación de nuevas metodologías que mejoren substancialmente la construcción de análisis más rigurosos.

1.5. Alcances

El propósito fundamental de esta investigación reside en demostrar de manera experimental y a través de los casos de estudio que han tenido lugar en el país, la aparición de procesos sismogénicos ionosféricos ante la posterior ocurrencia de terremotos cuyas magnitudes superan los 6° en la escala de Ritcher. Por lo tanto, se experimenta con datos GNSS que han sido tomados por la red de estaciones de rastreo continuo MAGNA - ECO, y a través de ellos obtener la variación del Contenido Total de Electrones en la ionosfera en periodos de aparente normalidad, presísmicos, sísmicos y posteriores a los eventos telúricos, siendo las anomalías ionosféricas precursores de estos; por lo que cabe resaltar que el fenómeno TEC presenta un comportamiento diario cuya estructura es reiterativa en el tiempo y que depende principalmente de la actividad solar, por lo tanto la variabilidad de la ionosfera por diversos factores se verá reflejada en la variación que sea registrada a través del Contenido Total de Electrones.

Resulta de carácter innovador el tratamiento de los datos GNSS más allá de la determinación del Contenido Total de Electrones, siendo la Transformada de Wavelet usada para la eliminación de ruido y la posibilidad de resaltar fluctuaciones en el tiempo de esta medida ionosférica que indican la presencia de comportamientos discrepantes a los registrados en periodos que no presentan actividad sísmica y por ende pueden llegar a significar alertas tempranas a fuertes terremotos.

Capítulo 2

La Atmósfera Terrestre

La atmósfera terrestre es una envoltura que contiene partículas en estado sólido, líquido y gaseoso que bajo procesos convectivos, difusivos y por efectos de la gravedad se mezclan y están en continuo movimiento [Sendiña y Pérez, 2006]; esta capa que recubre el planeta, actúa como escudo frente a la actividad del espacio exterior, entre ellas la radiación solar que es absorbida, transformada en energía térmica y expulsada de la atmósfera en forma de radiación ultravioleta [Ingersoll, 1983].

La capa atmosférica está compuesta principalmente por nitrógeno (N_2) en un 78 %, oxígeno (O_2) en 20,9 %, argón (AR) en 0,93 %, dióxido de carbono (CO_2) en 0,03 %, vapor de agua en cantidad variable, gases reactivos como óxido nítrico (N_2O_5), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3) y polvo atmosférico [Sendiña y Pérez, 2006,Ingersoll, 1983]. De acuerdo a condiciones físico - químicas esta envoltura del planeta se divide en la homosfera y heterosfera. La primera de ellas está comprendida hasta los $100km$ aproximadamente y es allí donde la mezcla de los componentes atmosféricos varía en función del gradiente de altitud, es decir, la mezcla será estable a menor altitud, mientras que el aumento de esta provocará inestabilidad en los componentes. Cabe resaltar que por los efectos de gravedad el oxígeno y nitrógeno son confinados a este estrato mientras que elementos con pesos atómicos menores como el hidrógeno y helio serán menos susceptibles de ser atraídos por la fuerza de gravedad y por lo tanto se ubicaran en la heterosfera.

Por su parte, la heterosfera tendrá lugar por encima del límite superior de la homosfera, allí se desarrollan procesos asociados a la actividad solar. Las partículas presentes son expuestas a procesos de ionización y reconfiguración molecular [Lyon, 2000] que hacen inestables las condiciones de las mezclas; así también, motivados por su mínimo peso molecular y por la disminución de los efectos de la gravedad las partículas pueden escapar o ingresar a la capa atmosférica.

En tal sentido, la atmósfera presenta variaciones en función altitudinal, dando lugar a una estratificación atmosférica con características físicas y químicas que se mencionarán

a continuación y siendo susceptible de clasificar las subdivisiones atmosféricas así: según temperatura, campo magnético, ionización y efectos de propagación de ondas electromagnéticas.

Según el factor temperatura la estratificación atmosférica estará dado por la Ec. 2.1 denominado el gradiente térmico [Sendiña y Pérez, 2006]

$$\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.1}$$

y da lugar a las siguientes subdivisiones (Ver Figura 2.1). En primera instancia se encuentra la *tropósfera* a una altitud entre $10km$ y $15km$, allí tienen lugar los cambios climáticos que afectan la vida diaria en el planeta, siendo el objeto de estudio para la meteorología. En la tropósfera, los elementos principales son nitrógeno (N_2) cuya actividad geoquímica es prácticamente nula y únicamente cumple un proceso de acumulación, por otra parte el oxígeno (O_2) siendo parte del proceso aeróbico animal y estando involucrado en procesos meteorológicos como el ciclo hidrológico [Camilion, 2013, Ingersoll, 1983]. Las condiciones troposféricas estarán dadas en función de la latitud y estación del año; donde la temperatura decrece en función del aumento de la altitud a razón de $-6{,}5°$C por km^{-1}.

La *estratósfera* que se extiende desde el límite superior de la troposfera hasta los $45km$ de altitud con altas cantidades de ozono (O_3) absorbiendo casi que en su totalidad de radiación solar $UV - B$ y parte de radiación $UV - A$ en longitudes de onda entre $0\mu m < \lambda < 4\mu m$ aproximadamente [Sendiña y Pérez, 2006]. Las corrientes de aire únicamente presentan movimientos horizontales por la densidad del aire frío que se encuentra en la parte baja del estrato atmosférico. En ese sentido, la temperatura aumenta sustancialmente [Ingersoll, 1983, Palacios, 2010], provocando un ambiente seco pero estable químicamente. Siguiendo la secuencia atmosférica se encuentra la mesosfera, cuya temperatura desciende en condiciones similares a la troposfera y está comprendida entre $80km$ y $90km$ de altitud.

El estrato denominado *termosfera*; allí la actividad es provocada por acción solar que aumenta la temperatura hasta alcanzar los 1000K por la absorción de radiación ultravioleta (UV-C), el gradiente térmico se estabiliza hasta alcanzar el límite superior del estrato atmosférico a $600km$. La actividad solar que influye en el comportamiento de la termosfera está representada por las eyecciones de masa coronal (EMC), llamaradas solares y viento solar que traen consigo partículas cargadas y junto con las altas temperaturas ocasionan el fenómeno de ionización sobre los átomos y moléculas dispuestos allí.

A $500km$ de altitud se encuentra la magnetosfera cuya función principal es la de repeler y proteger la tierra del campo magnético interplanetario (CMI) generado principalmente por los fenómenos solares mencionados previamente. Cabe resaltar que el viento solar, CMI y EMC propagan el campo magnético del sol provocando que la llegada de este

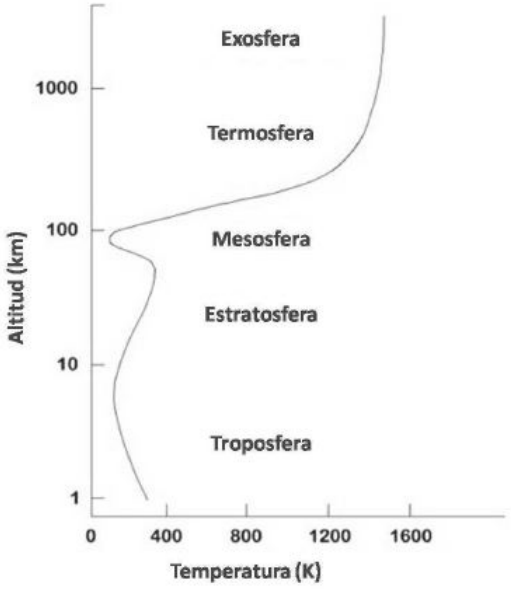


Figura 2.1: Gradiente de temperatura atmosférico. [Palacios, 2010]

a la atmósfera interactúe con el campo magnético terrestre, las interacciones del campo magnético y solar provoca bajo condiciones de orientación de los mismos el ingreso de partículas que lograrían ubicarse en el ambiente iononizado denominado ionosfera [Lyon, 2000]. Resta por mencionar la exosfera, superior a $600km$ sobre la corteza terrestre, donde las partículas se comportan como elementos individuales cuya densidad ha disminuido sustancialmente y pueden escapar o ser atrapadas en la capa atmosférica por efectos de gravitación [Camilion, 2013, Palacios, 2010].

2.1. La Ionosfera

La hipótesis de un ambiente ionizado en la atmósfera era motivo de especulación en el siglo XIX dados ciertos eventos donde se registran condiciones anormales del campo magnético terrestre. Se destaca el físico escoces *Balfour Stewart* que durante la tormenta magnética ocurrida entre Agosto 28 y Septiembre 3 de 1859, evidencia la ocurrencia de un evento geomagnético a través de la observación de manchas solares, la aparición de auroras boreales que el autor relata como de gran tamaño, el decremento de la inclinación, la intensidad horizontal y vertical del campo geomagnético, y lo relata así: *Disturbios magnéticos de inusual violencia que se han extendido y detectados en varios lugares simultáneamente* [Stewart, 1861]. Y a continuación revela que la polaridad de las redes de telégrafo han cambiado con frecuencia durante el evento, no encontrando evidencia alguna para este he-

cho. Aunque la tormenta geomagnética y las notables contribuciones por Stewart a través de sus meticulosas observaciones y mediciones realizadas no vislumbraron el camino al descubrimiento de la ionosfera, si abrieron un amplio sendero a la experimentación para la detección del estrato atmosférico.

En el inicio del siglo XX y apoyado en la ideas sobre las ondas y radiación electromagnética desarrollada por *Heinrich Hertz*, el ingeniero *Guillerme Marconi* comenzó por experimentar con el envío de ondas electromagnéticas sobre largos trayectos, se preveía que estas no podrían cruzar grandes distancias debido a que viajan en línea recta y la curvatura terrestre lo impediría. Para sorpresa de la comunidad científica, Marconi logró enviar y recibir ondas electromagnéticas entre Polhu en Cornualles (Inglaterra) hasta San Juan de Terranova (Canadá) (Ver Figura 2.1) [Pérez, 2001], evidenció así la existencia de un ambiente atmosférico que reflejaba las ondas y permitía atravesar grandes distancias. Así también, encontró que las ondas sufrían menos interferencias durante el transito solar mientras que en la noche la susceptibilidad de sufrirlas o perder la señal aumentaba, es decir, el nivel de susceptibilidad estaba asociado a la densidad del ambiente atmosférico reflector que a su vez se encontraría en función de la actividad solar para el día en cuestión. Cabe resaltar que el físico *Nikola Tesla*, hacía 1899 logró transmitir ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia y detectando experimentalmente la ionosfera. Los descubrimientos de Tesla y Marconi entraron en disputa por la adjudicación de la patente de la radio, dado que los experimentos fueron realizados en la misma época.

El fundamento teórico de la ionosfera llegó posteriormente gracias a los trabajos de *Heaviside* y *Kenelly* en 1902, describiendo la existencia de campos magnéticos y propiedades eléctricas que permiten la reflexión de ondas electromagnéticas; por lo anterior, denominaron a esta sección atmosférica como *capa Heaviside – Kenelly.*

Posteriormente, el objeto de estudio de la ionosfera consistió en determinar la altura y densidad de esta capa; para ello, el físico ruso *George Breit* y el geofísico *Merle Tuve* desarrollaron la ionosonda. Este instrumento consistía en un radar que emitía pequeños pulsos electromagnéticos a diferentes longitudes de onda esperando la reflexión de los mismos para así determinar el límite inferior y superior ionosférico [Breit y Tuve, 1926]. A pesar de lo innovador que resultaba la ionosonda, las mediciones resultaron carentes de rigurosidad y así mismo los resultados. Para 1940, el físico *Edward Appleton* en base a la experimentación realizada por Marconi y Tesla, envió pulsos electromagnéticos durante el día y la noche variando la longitud de onda, esto le permitió identificar que la altura de la ionosfera presentaba una variación altitudinal; la capa *Heaviside – Kenelly* durante el transito solar oscilaba alrededor de los $90km$ y en la noche sufría un considerable aumento hasta los $250km$ de altitud, esta lámina atmosférica fue denominada *capa de Appleton* [Cipagauta, 2007].

En el año geofísico internacional (1957 – 1958) dió lugar a una rigurosa investigación en

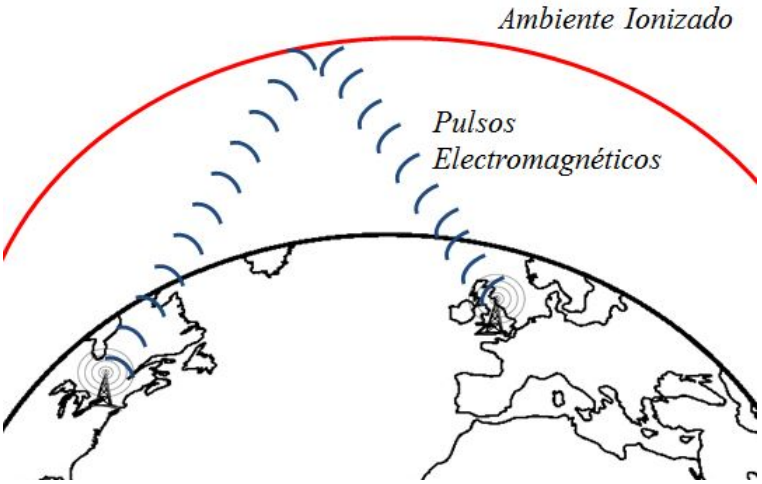


Figura 2.2: Modelo resumen del experimento llevado a cabo por *Marconi*. Reflexión de ondas electromagnéticas.

el campo de la física ionosférica, se realizó un importante esfuerzo logrando instalar en el planeta una red de monitoreo ionosférico que permitió obtener medidas de: asociación geomagnética e ionosférica, relación físico – química entre la tierra y el sol, auroras boreales, radiación cósmica, entre otros [Malone, 1997].

Durante la guerra fría y los constantes avances científicos se da inicio del programa espacial, en términos geofísicos los primeros frutos de la investigación de la alta atmósfera se dan con la puesta en órbita del satélite *Alouette* cuyo objetivo principal era el monitoreo de la heterosfera para así determinar las variaciones de la densidad de electrones en el ambiente ionizado [Cipagauta, 2007].

Los avances en la última parte del siglo XX han permitido determinar que el ambiente ionosférico se genera principalmente por la radiación solar y está fuertemente influenciado por el CMI, las eyecciones de masa coronal, viento solar y por la variación latitudinal de la magnetosfera [Rishbeth, 1998]. Así mismo, la innovación tecnológica y la puesta en marcha de los *Sistemas de Posicionamiento Global* han abierto un camino para continuar la investigación de la alta atmósfera en diversos campos de investigación científica.

2.1.1. Estructura Ionosférica

Como se mencionó anteriormente, la ionosfera hace parte de termosfera en la alta atmósfera, donde tienen lugar procesos que están correlacionados a la actividad solar principalmente. Esta capa atmosférica contiene átomos de Hidrógeno (H), Helio (He), Nitrogeno (N_2), Carbono (C), Oxígeno (O_2 *y* O_3), elementos atómicos en menores proporciones [Parra, 2014], electrones libres e iones que se desprenden de estructuras moleculares a menores altitudes (*estratosfera y mesosfera*) por procesos de fotoionización y disociación

La ionosfera es un estrato atmosférico que se encuentra por encima de la mesosfera a $90km$ de altitud aproximadamente, mezclándose en su límite superior con la plasmosfera y llegando a interactuar con el campo magnético terrestre [Reinisch, 2014]. Anteriormente se relató la experimentación llevada a cabo a través de la historia que permitió descubrir la existencia de esta capa, sus propiedades físico – químicas y la interacción de esta con las ondas electromagnéticas. Esta capa es un plasma magnetizado que presenta oscilaciones naturales que dependen de la densidad de electrones por unidad de volumen (N), la masa (m), carga del electrón (e), la permitividad eléctrica en el vacio [Cipagauta, 2007] y la variación en función de la altitud convirtiendo el ambiente ionosférico en una estructura no constante.

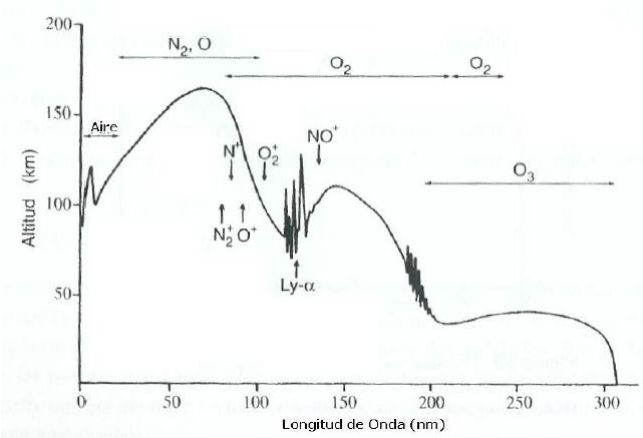
$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \tag{2.2}$$

De acuerdo a la Ec. 2.2, las ondas electromagnéticas atravesaran de manera natural el plasma de la capa ionizada si su frecuencia es $> \omega_p^2$; por el contrario, si la frecuencia es menor, el plasma absorberá parte de esta onda y logrará reflejarla a tierra. Para el caso de las ondas electromagnéticas emitidas desde los satélites en órbita y teniendo en cuenta su frecuencia, son susceptibles de sufrir retrasos en su viaje que se evidencia en las pseudo distancias obtenidas en tierra.

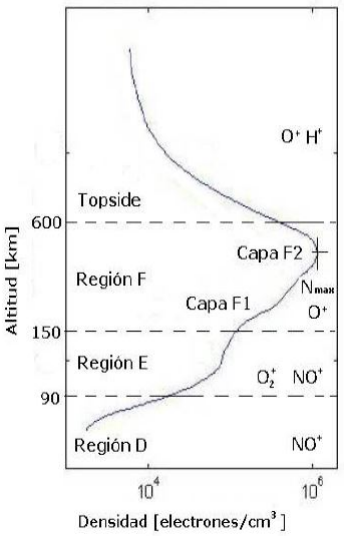
Cabe resaltar que el factor más preponderante en la densidad del plasma es la absorción atmosférica del flujo de fotones, que sucede a diferentes alturas y longitudes de onda (Ver Figura 2.3(c)) y provoca subregiones ionosféricas que se evidencia en el resultado de la interacción de la capa con ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias [Palacios, 2010]. De estas variaciones de la densidad del plasma se destacan tres subregiones mencionadas a continuación:

Subregión Ionosférica D:

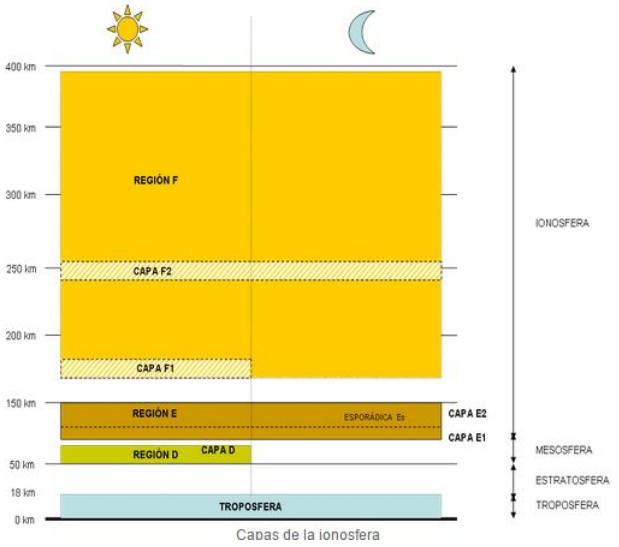
Esta región aparece únicamente por la absorción del flujo de fotones entre los $50km$ y $90km$ y presenta la menor densidad de electrones por lo que las ondas electromagnéticas de alta frecuencia son simplemente absorbidas (Ver Figura 2.3(b)). El óxido nítrico presente allí y por absorción de radiación Lyman - α del hidrógeno cuya longitud de onda es



(a) Absorción de radiación solar por los constituyentes ionosféricos. [Cipagauta, 2007]



(b) Variación de la densidad del ambiente ionosférico en función de altitud [Cipagauta, 2007]



(c) Variación ionosférica diurna y nocturna Tomado de Federación Mexicana de Radioexperimentadores

Figura 2.3: Comportamiento del ambiente ionosférico

121 ηm da como resultado iones de (NO^+) [Cipagauta, 2007]. Por otra parte, los rayos X que actúan sobre todos los elementos atmosféricos provoca la generación de iones como: H_3O, $H_5O_2^+$ [Gambosi, 1998]. Cabe resaltar que la mezclas químicas son estables por lo que el proceso de ionización es bajo respecto a las recombinaciones químicas que pueden establecerse.

Subregión Ionosférica E:

También conocida como la capa Kenelly – Heaviside que se extiende entre los $90km$ y $130km$. La densidad de electrones aumenta siendo los principales elementos presentes allí el oxígeno e hidrógeno (Ver Figura 2.3(b)). Por lo anterior, este región refleja la mayor cantidad de ondas de radio emitidas desde tierra.

De la misma manera, la ionización se da por la absorción de radiación solar que aumenta la temperatura y provoca la aparición de iones que emergen de los elementos previamente mencionados (O_2^+, O_2^+ y O^+) [Gambosi, 1998]. En tal sentido, cuando la radiación aumenta, y por los procesos de ionización puede aparecer un nuevo estrato denominado *E - Esporádica* que desaparece con la disminución del flujo de radiación. Tiene una gran importancia para las condiciones geomagnéticas dado que allí se presentan las campos electromagnéticos reconocidos como el electrochorro ecuatorial y auroral [Palacios, 2010].

Subregión Ionosférica F:

Por encima de la subregión E hasta fundirse y compartir el límite inferior de la magnetosfera. Es la capa con mayor ionización dado que recibe la mayor cantidad del material particulado proveniente principalmente de la actividad solar y además absorbe grandes cantidades de radiación en el intervalo de longitud de onda $10\eta m < \lambda < 90\eta m$ [Gambosi, 1998, Cipagauta, 2007]. La absorción de flujo solar provocará una variación diurna con división de la capa; la primera de ellas estará comprendida entre $130km$ y $200km$ denominada *F1*, mientras la segunda entre $200km$ y $500km$ cuya densidad será superlativa frente a la subregión *F1*. La composición química de la capa F se define por la presencia de oxígeno monoatómico, diatómico y triatómico (ozono) que por efectos de ionización provoca la generación de iones, electrones libres que interactúan y colisionan a grandes velocidades.

2.1.2. Fuente y Absorción de Radiación Solar

El estrato atmosférico es ionizado principalmente por la intensa actividad solar del cual se señalan eventos que se acentúan en la ionosfera de manera sistemática (ciclos solares) y en muchos otros casos de forma aleatoria que se mencionaran posteriormente.

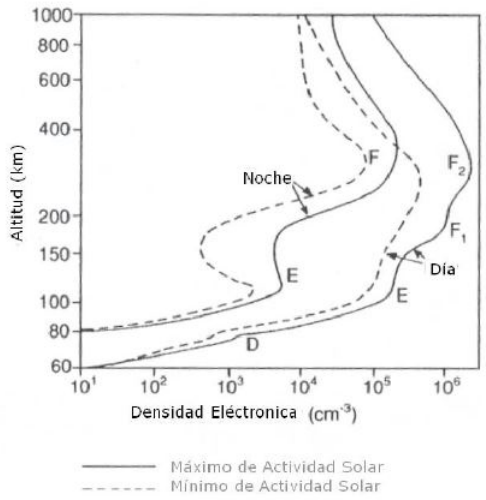


Figura 2.4: Variación diurna y nocturna de la subregión F. [Cipagauta, 2007]

El sol es una inmensa fuente de energía compuesto básicamente de hidrógeno, helio y en menores cantidades de argón, calcio, carbón, hierro, magnesio, neón, oxígeno, nitrógeno y níquel. En el núcleo solar se desarrollan procesos de fusión termonuclear entre el hidrógeno y helio provocando temperaturas que alcanzan $1{,}6 \times 10^7 K$ [Shunck y Nagy, 2009], este es el lugar de emisión de la mayor cantidad de energía lumínica denominada *fotonosfera*, allí la temperatura disminuye hasta los $4500K$ indicando el límite superior. El estado de la materia en la parte inferior de la *cromosfera* tiende a ser gaseoso y por el comportamiento del gradiente de temperatura que aumenta hasta alcanzar los $25000K$ provoca en la materia procesos de ionización y su transformación en estado plasma.

Es importante mencionar la rotación diferencial heliolatitudinal que provoca para sí una dinamo autoinducida; por lo anterior, el giro polar sucede en 36 días aproximadamente mientras que en la zona ecuatorial el periodo rotacional será de 25 días. En ese sentido, la circulación diferencial de la masa solar genera movimientos de convección que produce corrientes eléctricas y cuya variación da lugar a líneas de campo electromagnético.

Ahora bien, la capa con mayor influencia sobre la atmósfera terrestre es la *corona solar*, dado que allí tienen lugar los siguientes fenómenos: viento solar, eyecciones de masa coronal (EMC), llamaradas y manchas solares, provocados principalmente por la aparición de campos electromagnéticos mencionados previamente. Este estrato solar se encuentra en estado plasmático ionizado y bajo la superficie, las líneas de campo magnético fluyen en dirección al núcleo solar atrapando el material plasmático que busca escapar; sin embargo, sobre la superficie coronal el material particulado es susceptible de escapar y se denomina viento solar [Shunck y Nagy, 2009, Cid Torturero, 2003]; este está compuesto

por electrones y protones que son liberados al espacio trayendo anidado campo magnético solar y dando lugar al campo magnético interplanetario (CMI) [Ruiz, 2014]. El viento solar emitido adquiere la configuración geométrica de espiral (Espiral de Parker) (Ver Figura 2.5) inducido por el plano de la eclíptica que curva las líneas de campo magnético. La velocidad de emisión en los polos estará por el orden de los 500 $kmsg^{-1}$ mientras que en regiones helioecuatoriales alcanzará velocidades entre 600 y 1200 $kmsg^{-1}$ [Ruiz, 2014].

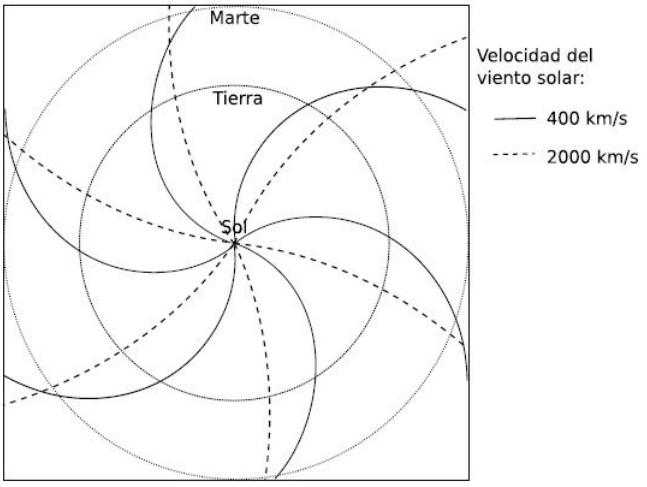


Figura 2.5: Forma geométrica de la emisión del viento solar [Ruiz, 2014]

De acuerdo a la variación heliolatitudinal de rotación, las líneas de campo electromagnético cambian en diferentes escalas temporales por lo que se anulan y reconectan [Shunck y Nagy, 2009]. La anulación de estas líneas motiva la aparición de manchas sobre la superficie solar de color negro, indicando una baja emisión de radiación en el área del evento y una disminución relativa de la temperatura; a este fenómeno se asocia generalmente con el ciclo solar que ocurre en periodos de 11 años aproximadamente, aunque pueden aparecer de manera aleatoria tanto espacial como temporalmente. Así mismo, las manchas solares pueden mutar a protuberancias que corresponden a entramados de líneas de campo magnético diferenciables bajo referencias geométricas ordenadas inmersas en la corona solar (Similar a una bobina) y no ordenadas sobre el límite superior coronal (Similar a un enredo de cabellos) [Cid Torturero, 2003]; de estos últimos cabe resaltar que aumentos inesperados de temperatura, así como la pérdida del equilibrio mecánico pueden provocar la reconexión de campos electromagnéticos y tienen lugar grandes explosiones con despredimientos de inmensos fragmentos coronales en condiciones similares al vientos solar que se expanden en el espacio perdiendo velocidad y masa, más sin embargo el impacto de una EMC sobre la tierra provoca radio interferencias, en las altas latitudes las auroras

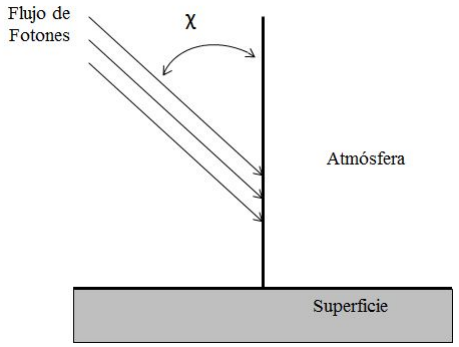


Figura 2.6: Ángulo cenital solar χ. Modificado de [Shunck y Nagy, 2009]

boreales, entre otros [Palacios, 2010].

El resultado de los eventos solares descritos previamente viajan a través del espacio exterior en todas las direcciones (Ver Figura 2.5), llegando a interactuar con la magnetosfera que recibe el impacto de las ondas de choque, dejando como resultado material que se repele y parte del mismo que logra ingresar en la ionosfera.

En cuanto a la atmósfera terrestre, la ionización se da por el aumento de la temperatura y es generada por el flujo de fotones que pueda ser reflejado, transmitido o absorbido [Palacios, 2010] por la alta atmósfera. Sentido por el cual, se asume una capa delgada horizontal a una altura a $350km$ (Se presume que a esta altitud se presenta la mayor ionización atmosférica), y la intensidad del flujo de fotones estará dado por la expresión [Shunck y Nagy, 2009]:

$$dI(s_\lambda) = -I(s_\lambda)n(z)ds_\lambda \tag{2.3}$$

Donde la intensidad del flujo depende de la densidad del plano estratificado $n(z)$ y el rayo de radiación solar esta representado por s_λ. Teniendo en cuenta el cambio del ángulo cenital debido al transito solar (Ver Figura 2.6), s_λ es expresado por $-dz \sec \chi$. Reemplazando este último en la Ec. 2.3 se obtiene la Ec. 2.4 siendo χ el ángulo cenital del sol.

$$I(s_\lambda) = n(z) \sec \chi dz \tag{2.4}$$

Se considera un flujo de fotones constante que es absorbido a una altura de referencia [Shunck y Nagy, 2009] y que además decrece en función de la altitud, está última característica es representada en la Ec. 2.5, obteniendo el flujo de fotones absorbido en función del ángulo cenital solar y de la altitud a la cual se asume la de mayor absorción de radiación solar (Ver ecuación 2.6).

$$\ln[I_\infty/I(H)] = \int_z^\infty n(z)\sec\chi dz \tag{2.5}$$

$$I(z,\chi) = I_\infty exp[-n(z)\sec\chi] \tag{2.6}$$

De acuerdo a lo anterior, existe una transferencia de energía entre el flujo de fotones y la absorción de esta radiación que provoca un aumento del gradiente de temperatura de la alta atmósfera junto con el desarrollo de procesos de ionización de átomos, electrones e iones presentes en la termosfera; así también otros procesos de recombinación átomica y molecular como: recombinación disociativa de iones moleculares, recombinación radiactiva de iones atómicos e intercambio de cargas [Camilion, 2013], lo anterior tiene luegar en longitudes de onda < 900Å y de disociación cuyas longitudes de onda son > 900Å [Shunck y Nagy, 2009].

2.2. Propagación de Señales Electromagnéticas a través de la Ionosfera

Considerándose la propagación de ondas electromagnéticas en el sentido de una mera aproximación teórica, se conoce que estas viajan en el vacío a la velocidad de la luz ($c = 2{,}998 \times 10^8 \frac{m}{seg^2}$); sin embargo, en la caso particular de la ionosfera y como se explicó en el apartado anterior, las características físicas y químicas de este estrato atmosférico son diametralmente opuestas a las condiciones ideales del vacío, por lo cual, la onda electromagnética proveniente de un satélite que está en órbita alrededor del planeta y que en un tiempo t_0 se encuentra en la posición k_i, la señal emitida es susceptible de la modificación de su trayectoria y retardos en camino a un dispositivo de recepción en tierra.

Ahora bien, considérese un espacio tridimensional euclidiano, donde $\overrightarrow{R_i}$ corresponde a la ubicación de un receptor GPS y $\overrightarrow{S_i}$ a la posición de un satélite sobre la esfera de observación de dicho observador en un tiempo t_0. En ese sentido, la señal electromagnética monocromática, es decir la fase portadora, emitida desde el espacio deberá atravesar en condiciones ideales la distancia comprendida entre el observador y el satélite dada por la Ecu. 2.7; sin embargo, asumiendo la ionosfera como una capa delgada a $350km$ de altitud entre el receptor y el emisor, donde la señal será susceptible del medio por lo que tomará trayectorias alternas dl y modificaciones de su velocidad v en camino a tierra.

$$\overrightarrow{d\rho} = \overrightarrow{S_i} - \overrightarrow{R_i} \tag{2.7}$$

De acuerdo a la Ec. 2.7, se expresa esta distancia en función de velocidad y tiempo.

$$dl = vdt \Longrightarrow v = \frac{dl}{dt} \Longrightarrow dt = \frac{dl}{v} \tag{2.8}$$

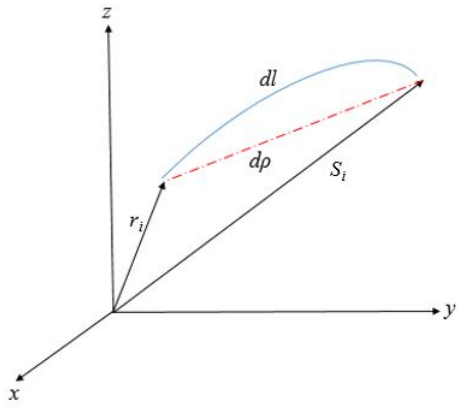


Figura 2.7: Propagación de ondas electromagnéticas por trayectorias alternas debido al medio ionosférico. Modificado de: [Mohino Harris, 2005]

Resolviendo la ecuación diferencial planteada en 2.8 para el tiempo dt, se integrará en ambos lados de la ecuación cuyo límite superior e inferior respectivamente serán $\overrightarrow{S_i}$ y $\overrightarrow{R_i}$; de esta forma se encuentra que τ es el retardo total entre la emisión desde el satélite y la recepción por el dispositivo GPS.

$$T_R^S = \int_{R_i}^{S^i} \frac{dl}{v} \tag{2.9}$$

No obstante, aún no se ha incluido dentro del análisis el medio dispersivo que atraviesa la señal; por lo tanto, se agrega a la descripción del fenómeno el índice de refracción, siendo este la relación entre la velocidad de propagación de la luz en un medio ideal y en otro que no lo es. Donde c es la velocidad de la luz en el vacio y v la velocidad de la luz en otro medio.

$$n = \frac{c}{v} \tag{2.10}$$

Reemplazando 2.10 en 2.8, se reescribe la Ec. 2.9:

$$T_R^S = \int_{R_i}^{S^i} \frac{n}{c} \cdot dl = \int_{r_R}^{k^S} \left(\frac{1}{c} + \frac{n-1}{c}\right) \cdot d\rho + \left(\int_{R_i}^{S^i} \frac{n}{c} \cdot dl - \int_{R_i}^{S^i} \frac{n}{c} \cdot d\rho\right) \tag{2.11}$$

$$\frac{\rho_R^S}{c} + \int_{R_i}^{S^i} \frac{n-1}{c} \cdot d\rho + \left(\int_{R_i}^{S^i} \frac{n}{c} \cdot dl - \int_{R_i}^{S^i} \frac{n}{c} \cdot d\rho\right) = \frac{\rho_R^S}{c} + \frac{\delta\rho_{atm}}{c} \tag{2.12}$$

Cabe resaltar de la Ec. 2.12, $\frac{\rho_R^S}{c}$ es la distancia geométrica entre el receptor y el satélite [Palacios, 2010]. Por otra parte, el segundo término de la expresión corresponde

explicitamente al paso de la señal por el medio dispersivo, por lo cual puede ser tratado de manera independiente, siendo que al despejar $\frac{\delta\rho_{atm}}{c}$ de 2.12 se obtiene:

$$\delta\rho_{atm} = \int_{R_i}^{S_i} n - 1 \cdot d\rho + \left(\int_{R_i}^{S_i} n \cdot dl - \int_{R_i}^{S_i} n \cdot d\rho \right) \tag{2.13}$$

En conclusión, se describe el error de propagación de la fase portadora como el supuesto del paso de la señal por un medio ideal siendo este dispersivo y correspondiente a la primera integral de la Ec. 2.13, por otra parte el contenido de error del segundo término es mínimo dado que es la curvatura del rayo electromagnético debido a la refrección del medio y por lo tanto es despreciable [Mohino Harris, 2005].

Desde la plataforma satelital se emiten dos ondas portadoras denominadas *L1* y *L2*, cada una de ellas en una frecuencia específica, para este tipo de ondas, anteriormente se ha descrito el retardo ionosférico.

De otro aspecto, sobre *L1* y *L2* se articula una modulación, dejando de ser una señal monocromática [Kaplan y Hegarty, 2006], y adquiriendo características como la velocidad de modulación o de grupo v_G, velocidad de la fase v, frecuencia angular ω y el número de onda k, que se relacionan en la Ec. 2.14.

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} = v + k\frac{dv}{dk} \tag{2.14}$$

Al igual que en el caso de la fase portadora, se introduce el índice de refracción como el elemento representativo del paso de las ondas electromagnéticas moduladas por la capa ionizada; por lo tanto, el índice de refracción del grupo v_G está relacionado al índice de refracción de la fase n [Mohino Harris, 2005] así:

$$n_G = \frac{c}{v_G} = c \cdot \frac{dk}{d\omega} = n - c\omega\frac{1}{c^2}\frac{dv}{d\omega} = n + \frac{dn}{d\omega} \tag{2.15}$$

Del índice de refracción es de resaltar que se asume el ambiente ionizado como un material dieléctrico, es decir, la absorción de la señal inmersa en el medio será mínima y en muchos casos la señal emitida será reflejada bajo un proceso gradual [Hargreaves, 1992] de acuerdo a la frecuencia de la misma. Por las características mencionadas previamente, se diverge del concepto de índice de refracción presentado en la Ec. 2.10, para modelar el retardo por la ecuación de *Appleton - Hartree*:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - Zi - \left(\frac{Y_T^2}{2(1-X-Zi)}\right) \pm \left(\frac{Y_T^4}{4(1-X-Zi)} + Y_L^2\right)^{1/2}} \tag{2.16}$$

Donde:

$$X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}, \tag{2.17}$$

$$Y = \frac{\omega_B}{\omega} \tag{2.18}$$

$$Z = \frac{v}{\omega} \tag{2.19}$$

$$Y_L = \frac{\omega_B \cos\theta}{\omega} \tag{2.20}$$

$$Y_T = \frac{\omega_B sen\theta}{\omega} \tag{2.21}$$

$$\tag{2.22}$$

En la tabla 2.1 se describen los elementos de la Ecu. 2.16, cabe resaltar que los elementos X, Y y Z son cantidades adimensionales.

VARIABLES	CORRESPONDENCIA
ω_N	Frecuencia angular del plasma
ω_B	Girofrecuencia del electrón
θ	Ángulo entre la dirección de propagación y el campo geomagnético
ω_L	Componente longitudinal de ω_B respecto a la dirección de propagación
ω_T	Componente transversal de ω_B respecto a la dirección de propagación
v	Frecuencia de colisión del electrón
ω	Frecuencia angular de la onda.

Cuadro 2.1: Descripción de las variables de la Ecu. 2.16

Así mismo, de la Ecu. 2.16 se concluye que la ionosfera es un medio heterogéneo, anisótropo, dispersivo, absorbente y particularmente birrefrigente, es decir, las ondas electromagnéticas en diferente polarización viajan a diferentes velocidades [Mohino Harris, 2005]. Centrando el análisis a ondas electromagnéticas cuya frecuencia está en el rango de los $(0 - 2GHrtz)$, se dejaran de lado los efectos del campo magnético sobre las mismas, despreciando Y, Y_L y Y_T por contener un mínimo error, y $Z = 0$, dado que no existe absorción (En el caso de las ondas electromagnéticas L1 y L2, sus frecuencias son mayores a la frecuencia natural del plasma, por lo cual, la absorción es prácticamente inexistente) y se asume como constante el valor máximo del campo magnético terrestre $(6 \times 10^{-5}T)$, la cota máxima de la girofrecuencia del electrón $(1{,}7MHrtz)$ y el máximo valor de la frecuencia de colisión de electrones $(1{,}6MHrtz)$ [Hargreaves, 1992, Mohino Harris, 2005]. Con estos supuestos, la Ecu. 2.16 da una aproximación del retardo ionosférico de las señales GNSS; sin embargo, este índice de refracción dista del índice de refracción del grupo

n_G, en tal sentido, se desarrolla la expresión 2.23 a través de una serie de Taylor y tomando su primera aproximación (Ver Ecu. 2.24)

$$n^2 = 1 - X = 1 - \frac{\omega_N^2}{\omega^2} \tag{2.23}$$

$$n = \sqrt[2]{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{\omega_N^2}{2\omega^2} \tag{2.24}$$

Se reescribe la Ecu. 2.13, por la Ec. 2.24, para una onda electromagnética de frecuencia $f = \frac{\omega}{2\pi}$, obteniendo:

$$\delta\rho_{ion} = \int_{R_i}^{S_i} \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m f^2} \cdot d\rho = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m f^2} \int_{R_i}^{S_i} N \cdot d\rho = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m f^2} STEC = \frac{\alpha}{f^2} STEC \tag{2.25}$$

VARIABLES	CORRESPONDENCIA
e	Carga del electrón.
m	Masa del electrón.
ε_0	Permitividad en el vacío.
α	Constante del Contenido Total de Electrones, es $40{,}28\frac{m^3}{sg^2}$.

Cuadro 2.2: Descripción de las variables de la Ecu. 2.25

Se ha demostrado la existencia del retardo inosférico para las señales electromagnéticas emitidas desde el segmento espacial del sistema GNSS, quedan por mencionar aspectos relevantes de los resultados obtenidos en la Ecu 2.25. En primera instancia, cabe resaltar que tanto la fase portadora como el código o fase modulada sufrirán retardos de la misma magnitud pero con signos contrarios, por lo tanto, la fase tiene un adelantamiento, mientras el código un retraso. Respecto *STEC*, corresponde a la cantidad de electrones que interfieren en un rayo electromagnético oblicuo a la ionosfera en su viaje, esta medida corresponde a $10^{16} electrones/m^2$, por lo que se adhiere un nuevo elemento que permita mutar dicha oblicuidad a una verticalidad, es decir que la señal atraviese el ambiente ionizado de forma perpendicular, llamada función de mapeo.

Para dar explicación a esta función, se recurre la Ecu. 2.7, normalizando $\overrightarrow{R}$ y $\overrightarrow{d\rho}$ y calculando el producto interno de estos.

$$\widehat{R} \cdot \widehat{d\rho} = \cos Z_{pi} \tag{2.26}$$

De acuerdo a la Figura 2.8, se observa el triángulo que se forma entre el receptor, el corte del rayo con la ionosfera y el centro de la tierra. Se quiere conocer Z_{pi}, por lo tanto, aplicando la ley de senos se tiene:

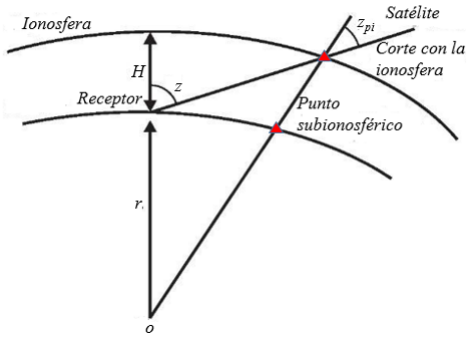


Figura 2.8: Representación geométrica del Contenido Total de Electrones Vertical. Modificado de: [Schaer, 1999]

$$\frac{sen(180 - z)}{R + h_i} = \frac{sen\ Z_{pi}}{R} \tag{2.27}$$

Despejando de 2.27, Z_{pi} se obtiene:

$$Z_{pi} = arcsen\ \left(\frac{Rsen\ Z}{R + h_i}\right) \tag{2.28}$$

De esta forma, se obtiene el ángulo Z_{pi} y así calcular el Contenido Total de Electrones Vertical o *VTEC*.

$$VTEC = \frac{\alpha}{f^2} STEC \cdot \cos Z_{pi} \tag{2.29}$$

Capítulo 3

La Transformada de Wavelet

La *Wavelet* u *ondícula* es una herramienta de análisis matemático que remonta su desarrollo hacía la primera década del siglo XX [Chaovalit et al., 2011], ha tenido gran desarrollo y acogida para el procesamiento de datos desde finales del último siglo [Stolojescu, 2011]. Predominan tres hechos principalmente en el desarrollo de las Wavelet; en primera instancia el trabajo de investigación desarrollado por Grossman y Morlet hacía 1980 enfocado en física cuántica, por otra parte, el desarrollo del análisis multiresolución y su aplicación al procesamiento digital de señales expuesta por Mallat (1985), filtros y bases ortonormales de Wavelets [Stolojescu, 2011] basados en espacios de Hilbert cuyos elementos son obtenidos por translaciones con enteros de una única función denominada la Wavelet madre [Eckley, 2001]. Por último, Daebuchies (1988), basada en la investigación llevada a cabo por Mallat, desarrolló un conjunto de funciones ortonormales de Wavelet piedra angular de las aplicaciones desarrolladas actualmente [Castro y Castro, 1988].

Este método se presenta como alternativa a los métodos convencionales (*métodos estadísticos, transformada de Fourier, entre otros*) para la manipulación, procesamiento y análisis de diversos tipos de bases de datos sean discretos o continuos que crecen de manera exponencial con los avances tecnológicos alcanzados en la actualidad en diferentes ámbitos.

En ese sentido, la implementación de la transformada de Wavelet en diferentes campos del conocimiento donde son relevantes investigaciones realizadas desde la medicina, más exactamente en el análisis de electrocardiogramas y electroencefalogramas desde la perspectiva de series de tiempo buscando detectar anomalías coronales y/o del miocardio ó comportamientos singulares en la actividad cerebral [Kumar et al., 2014, Dasdemir et al., 2015]. Así también en el análisis de señales de audio y video para su descomposición espectral y la detección de patrones morfológicos específicos de la secuencia gráfica, respectivamente [Lambrou et al., 1998, Wang et al., 1997]. De acuerdo a lo anterior, cabe resaltar el uso de esta herramienta para el procesamiento digital de imágenes satelitales con el fin de mejorar su resolución espacial para la detección y clasificación de patrones geo espaciales,

elementos urbanos, formaciones hidrológicas, entre otros. [Medina y Lizarazo, 2004, Chuvieco, 1996]. Algunas otras investigaciones enfocadas en ciencias de la tierra destacan el uso de Wavelets en geodinámica [Beltrán y Colmenares, 2011], investigaciones de la alta atmósfera [Mautz et al., 2005], en geodesia, geofísica y análisis de series de tiempo del Contenido Total de Electrones en regiones específicas cuyo fin es la detección de patrones anormales y singularidades en su comportamiento [Percival, 2008].

A continuación se describen los aspectos matemáticos de las Wavelet, partiendo de la transformada de Fourier que esta basada en la idea de representar funciones, datos discretos o continuos a través de la sumatoria de armónicos ortonormales. Sin embargo, a pesar de la robustez de esta herramienta, si la información analizada presenta saltos abruptos, variaciones en la amplitud respecto al tiempo en el caso de señales y/ o discontinuidades irregulares, los resultados en la detección de determinadas frecuencias y su evolución en el tiempo serán ciertamente limitadas con respecto a la amplitud y frecuencia de las mismas [Acevedo Martinez, 2009].

Para ello, alternativamente el uso de la transformada de Wavelet donde el sesgo temporal es eliminado por el uso de una función denominada *ondícula* que es localizable en el tiempo, permitiendo la detección y el análisis de las características espectrales previamente mencionadas.

3.1. Transformada de Fourier

El análisis de Fourier nace de la primicia de representar una función $f(t)$ de periodo $f(t+T_0)$ por la superposición de funciones armónicas ortonormales denominada serie de Fourier (Ver Ec. 3.1). No obstante, en el caso de funciones no periódicas es necesario la aplicación de la transformada.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}(a_k \cos \omega_0 t + b_k sen \omega_0 t) \tag{3.1}$$

La transformada de Fourier es la herramienta por excelencia para el análisis de señales, en ese sentido la aplicación de esta permite cambiar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Ver Figura 3.1) con el fin de desentrañar características espectrales del objeto de estudio.

Definición 3.1.1. Sea una función $f(t)$ en $\Re$, la transformada de Fourier para la función en el domino del tiempo estará dada por la expresión 3.2; donde α_k corresponde a los coeficientes de Fourier y ω_0 es la frecuencia fundamental.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_k e^{i\omega_0 t} \tag{3.2}$$

Figura 3.1: Esquema de aplicación de la transformada de Fourier. [Acevedo Martinez, 2009]

Los coeficientes de Fourier son dados por la expresión 3.3

$$\alpha_k = \frac{1}{T}\int_t^{t+T_0} f(t)e^{in\omega t} \tag{3.3}$$

De acuerdo a lo anterior, la función analizada se puede descomponer, expandir o sintetizar [Goswani y Chan, 2012] (Ver Ec. 3.4), siendo una sumatoria de expresiones senosoidales y cosenosoidales por la igualdad de Euler (Ver Ec. 3.6), que hacen parte de un conjunto funciones ortonormales de $\Re$. En ese sentido, se identifica la contribución de energía de cada función seno y coseno según su frecuencia .

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \alpha_k e^{i\omega_0 t} \tag{3.4}$$

$$e^{i\omega t} = \cos\omega t + sen i\omega t \tag{3.5}$$

$$e^{-i\omega t} = \cos\omega t - sen i\omega t \tag{3.6}$$

3.2. Transformada Discreta de Fourier

Probablemente, la aplicación de la transformada de Fourier en problemas reales esta condicionada a señales digitales; es decir, valores puntuales que presentan una variabilidad en el tiempo denominada *serie*. Más aún, el hecho de implementar esta herramienta en computadores requiere que el dominio del objeto de estudio sea discreto, donde a cada valor de una serie de números de $f_n(t)$ con $n = [1, 2, 3, ...N]$, tendrán un valor asignado en el dominio de la frecuencia con $F_n(\omega)$ con $n = [1, 2, 3, ...N]$ [Acevedo Martinez, 2009].

Definimos una función $f(\kappa t)$ discreta con valores en $t_1, t_2, t_3, ..., t_n$, estos últimos equidistantes entre si en el sampleo de la función. Ahora, aplicando la transformada de Fourier a esta función se obtendrá una función $F(n\omega_s)$ discreta cuyos valores en el dominio de la

frecuencia son: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, ..., \omega_n$, ω_s será la frecuencia del muestreo de la función; por lo anterior, pasando de un espacio continuo a uno discreto, la Ec 3.2 será reescrita así:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_n e^{\frac{i2\pi kn}{N}} \tag{3.7}$$

Donde $n, \kappa = [0, 1, 2, 3, ..., N-1]$ y N es el número de muestreo de la señal analizada. Los coeficientes obtenidos son representados en forma matricial de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & i & \dots & i^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & i^n & \dots & i^{n*n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

La matriz será cuadrada de $n \times n$ dada la longitud n de la señal y los elementos serán $\neq 0$ siendo un matriz densa [Goswani y Chan, 2012].

De acuerdo a lo anterior, el procesamiento de señales de gran tamaño representan grandes esfuerzos computacionales, para la cual se desarrolló un algoritmo denominado la *transformada rápida de Fourier* capaz de reducir dichos esfuerzos de N^2 pasos para la obtención de los coeficientes a $N \lg_2(N)$ a través de la reducción de información redudante en la aplicación de la transformada de Fourier. Cabe resaltar que la aplicación del algoritmo requiere que la cantidad de los datos a procesar sea una potencia de dos (2^n valores).

3.3. Transformada Corta de Fourier

Como se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo, la robustez en el procesamiento de señales por medio de la aplicación de la transformada de Fourier, ya sea en el caso continuo como en el discreto presenta grandes ventajas para la identificación de frecuencias y la cuantificación de la energía aportada en la señal. Sin embargo, el análisis del objeto de estudio será sesgado por condiciones de irregularidad, discontinuidades abruptas, la no estacionariedad, la cuasi – estacionariedad o principalmente frecuencias de tipo local [Goswani y Chan, 2012]; es decir, las características espectrales en el dominio de la frecuencia pasarán desapercibidas por su variabilidad temporal [Acevedo Martinez, 2009].

Con el objetivo de incluir el dominio del tiempo asociado a la frecuencia; el físico *Dennis Gabor* usó una función gaussiana como ventana temporal móvil de análisis con ancho específico que se desplaza a los largo de la señal analizada [Goswani y Chan, 2012]. Básicamente, esta ventana móvil se superpone sobre una sección (κ) de la función, se aplica la transformada y avanza hasta eliminar la intersección entre esta con su posición anterior, ubicándose en (κ+1); el procedimiento se reitera hasta cubrir la extensión total de la señal.

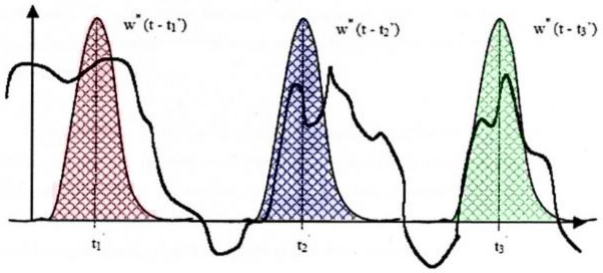


Figura 3.2: Transformada corta de Fourier, ventana de análisis. [Begoña, 2009]

La inclusión del tiempo por medio de la ventana móvil en el análisis espectral se observa en la Ec. 3.8 con el elemento $\phi(\tau+T)$, tal que la expresión matemática para la transformada es:

$$F(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\phi(\tau+T)e^{i\omega t}dt \tag{3.8}$$

Por lo anterior, será posible asociar frecuencias a determinados puntos en el tiempo; no obstante, el ancho de la ventana de análisis estará asociado a limitaciones en el procesamiento de la señal, dado que algunas funciones sugieren flexibilidad en la extensión horizontal de la ventana sobre la abscisa con el fin de mejorar la precisión en la identificación de frecuencias locales y su asociación respectiva con el dominio temporal.

3.4. Transformada Continua de Wavelet

En el desarrollo de la señal a través del tiempo, esta presenta condiciones mencionadas anteriormente que limitan el desarrollo satisfactorio del procesamiento de la misma a través de la transformada de Fourier. En ese sentido, cabe señalar que la grandes frecuencias tienen lugar en cortos periodos de tiempo, mientras que ondulaciones de baja frecuencia corresponderán a largos periodos en la señal; por ello, previamente se destacó el hecho de la inoperancia de la ventana temporal móvil de análisis expuesta en la sección anterior, dado que el ancho de la misma no tiene lugar a ningún tipo de flexibilidad de sus dimensiones.

Este hecho se evidencia en la Figura 3.3 donde la función con periodo determinado que alrededor del $t = 0{,}7$ y $t = 1{,}3$ presenta alteraciones abruptas, y que siendo analizadas desde la perspectiva de Fourier muestra el sesgo en la correspondiente asignación temporal de la frecuencia en $t = 0{,}7$, más sin embargo no es posible establecer las características espectrales de la segunda perturbación. De otro lado, la identificación de la primera alteración trae consigo alrededor de si, variaciones de frecuencia que tienden a normalizarse posteriormente pero de ningún modo representan el comportamiento de la señal.

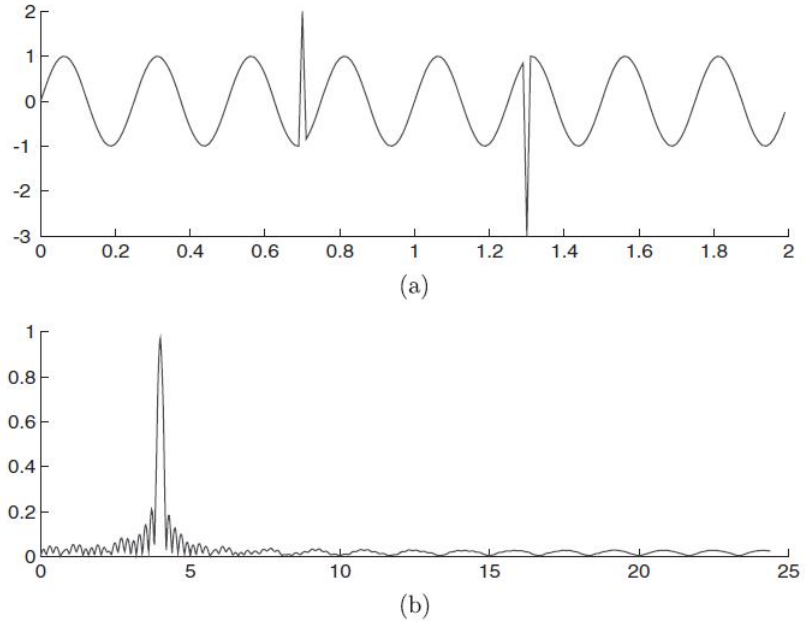


Figura 3.3: Sinusoide con perturbaciones en $t = 0{,}7$ y $t = 1{,}3$ [Goswani y Chan, 2012]

Figura 3.4: Esquema de la transformada de Wavelet [Acevedo Martinez, 2009]

Por lo anterior, la transformada de Wavelet es eficiente para el procesamiento y análisis de este tipo de señales, dado que existe flexibilidad en el tamaño de la ventana móvil de análisis con el fin de detectar frecuencias altas y bajas. Así también, el aspecto fundamental consiste en representar eficientemente la señal en el dominio *tiempo – frecuencia* (Ver Figura 3.4), con el fin de asociar y establecer tiempo – frecuencia por la dupla (ω_k, t_k).

Definición 3.4.1. Sea una señal o función $f(t) \in L^2(\Re)$ continua en el tiempo, su transformada está dada por la expresión:

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)dt \tag{3.9}$$

De acuerdo a 3.9, $\psi \in L^2(\Re)$ será una función ortogonal si cumple con 3.10, denominada *wavelet madre*, por otra parte, los coeficientes a, b están asociados a factores de escalamiento del soporte efectivo y traslación, respectivamente.

$$\langle \psi_\kappa(t), \psi_l(t) \rangle = \int \psi_\kappa(t), \psi_l(t)dt = 0 \tag{3.10}$$

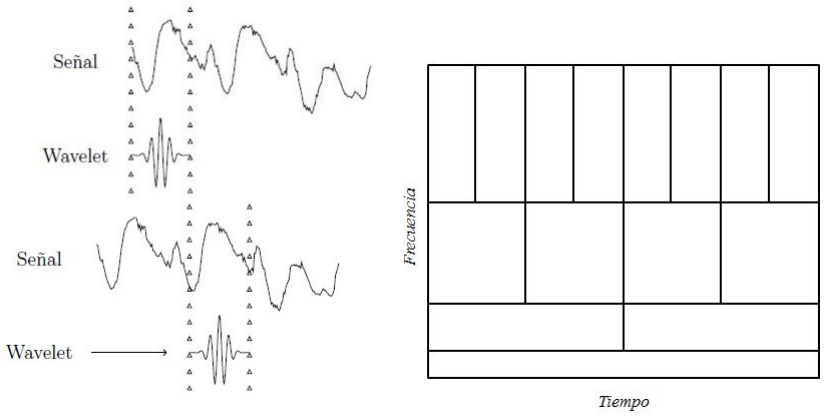
El factor a de compresión < 1 o de dilatación > 1 permite establecer el nivel de resolución del análisis sobre la señal; la variación del factor proporciona la obtención de información de la función, donde valores pequeños son detectados bajo el dominio del tiempo, mientras que grandes valores de $f(t)$ serán expresados en el dominio de la frecuencia [Stolojescu, 2011], por ello se podría llegar a establecerse que la transformada de Wavelet es principalmente una representación tiempo – escala que una tiempo – frecuencia [Goswani y Chan, 2012, Acevedo Martinez, 2009].

De otra parte, la Wavelet madre es una función de soporte compacto, es decir, una oscilación definida en un intervalo finito de valor medio $\psi(t)$ igual a 0, lo anterior con el fin de cumplir la condición de admisibilidad que permite la reconstrucción de la señal a partir de la transformada [Burrus et al., 1998] por medio de la siguiente expresión:

$$f(t) = \int\int F(a,b)\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)dadb \tag{3.11}$$

3.5. Transformada Discreta de Wavelet (TDW)

Sin embargo, en cuanto los volúmenes de datos a procesar se incrementan, la transformada continua de Wavelet muestra desventajas en la redundancia de los coeficientes calculados [Stolojescu, 2011]. De otra parte, la implementación de esta en sistemas computacionales requiere de un desarrollo discretizado, para lo cual, los factores de escalamiento y traslación en el dominio del tiempo – frecuencia pasan del espacio continuo al discreto.



(a) Representación de la ondícula a través del tiempo. Modificado de: [Acevedo Martinez, 2009]

(b) Tiempo – Frecuencia. Transformada continua de Wavelet.

Figura 3.5: Representación de la transformada de Wavelet

Definición 3.5.1. Sea una señal discreta $f(t) \in \mathbb{L}^2\mathbb{R}$ que pueda ser representada por expresión:

$$f(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \tag{3.12}$$

Donde los valores de $a_{j,k}$ surgen del producto interno por la Ec. 3.13, y la función $\psi_{j,k}$ es la *Wavelet madre* cuya forma general está dada por la Ec. 3.14.

$$a_{j,k} = \int_R \langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle dt \tag{3.13}$$

$$\psi_{j,k}(t) = s_0^{\frac{-j}{2}} \psi \left(\frac{t - k u_0 s_0^j}{s_0^j} \right), \quad con\ s_0 = 2\ y\ u_o = 1 \tag{3.14}$$

Ahora bien, considérese un vector $y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ cuya longitud n sea una potencia de dos, $n = 2^j$ que se denomina secuencia *diádica* [Nason, 2008]. En ese sentido, la secuencia se descompone en niveles a_j que corresponden a una asociación de los coeficientes *Wavelet madre* o de detalle d_k y de escalamiento, *Wavelet padre* o de aproximación c_j [Burrus et al., 1998].

$$a_{j-1} = (d_k, c_j) = y_{2k-1,j-1}, y_{2k,j}, \ldots \tag{3.15}$$

Donde k y $j \in \mathbb{Z}^+$. En ese sentido, se destaca que el incremento de k, j, aumenta los niveles de descomposición de la señal analizada mientras que disminuye la resolución de

la misma; este hecho lleva la TDW a un análisis multiresolución.

3.5.1. Análisis Multiresolución (MRA)

Implementado en el procesamiento digital de imágenes por [Mallat, 1989], consiste en descomponer la señal en enésimos niveles jerárquicos de resolución extrayendo de ella sea en 1 o 2-*Dimensiones* las características espectrales de interés que para el investigador son más relevantes. La combinación de la señal a diferentes niveles de aproximación dará lugar al análisis multiresolución [Stolojescu, 2011] y se constituye en piedra angular de la construcción de funciones discretas Wavelet.

Definición 3.5.2. Sea A_{2j} un operador lineal que aplicado a una función $f(t)$ de resolución 2^j cuyo niveles de resolución 2^{-j-1} pertenecen a una secuencia de subespacios cerrados V_j tal que $j \in \mathbb{Z}$ y donde:

$$\ldots V_{j-1} \ldots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \ldots \subset V_{j+1} \ldots \tag{3.16}$$

Tal que:

1. Existe la intersección trivial de los subespacios V_j

$$\lim_{j\to\infty} V_j = \bigcap_{-\infty}^{\infty} V_j = \{0\} \tag{3.17}$$

2. La unión de los subespacios

$$\lim_{j\to-\infty} \bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \mathbb{L}^2\mathbb{R} \tag{3.18}$$

3. Los subespacios V_j son proyecciones ortogonales de $f(t)$

$$\mathbb{P}V_j f = \sum_{-\infty}^{\infty} \langle f(t), \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k} \tag{3.19}$$

4. Las funciones $f(2t) \in V_l$ son aproximaciones 2^{-j} a diferentes niveles de resolución de la secuencia diádica que cumple con la condición:

$$f(t) \in V_0 \Leftrightarrow f(t - 2^j k) \in V_j \tag{3.20}$$

5. La aproximación a la función $f(t)$ cuya resolución sea 2^{-j-1} corresponde a una versión escalada del espacio V_o

$$\forall j \in \mathbb{Z},\ f(t) \in\ V_j \Leftrightarrow f(2^j t)\ t \in V_0 \tag{3.21}$$

6. Existe una función de escalamiento $\phi_{0,k}$ donde $k \in \mathbb{Z}$ cuyas traslaciones $\phi(2t - k)$ constituyen una función base del análisis multiresolución ortogonalizadas por el procedimiento de *Gram – Schmidt* [Stolojescu, 2011].

Anteriormente se mencionó la descomposición de la señal en coeficientes Wavelet padre y Wavelet madre, estos últimos ya expuestos. Los factores de aproximación son definidos como subespacios complementarios ortogonales W_j a los subespacios V_j. Por lo cual, se define el nivel de descomposición a_{j-1} como:

$$a_{j-1} = V_j \oplus W_j \tag{3.22}$$

Las características de los subespacios complementarios W_j son heredados de los subespacios V_j, tal que:

1. Es una descomposición mutuamente ortogonal de los detalles de la señal $f(t)$ que pertenecen a $\mathbb{L}^2\mathbb{R}$

$$\bigoplus_{j\in\mathbb{Z}} W_j = \mathbb{L}^2\mathbb{R} \tag{3.23}$$

2. Son proyecciones ortogonales de $f(t)$ expresado como:

$$\mathbb{P}W_j f = \sum_{-\infty}^{\infty} \langle f(t), \psi_{j,k}\rangle \psi_{j,k} \tag{3.24}$$

3. Los subespacios W_j son versiones escaladas del subespacio central W_0.

$$\forall j \in \mathbb{Z}, f(t) \in W_j \Leftrightarrow f(2^j t)\ t \in W_0 \tag{3.25}$$

De acuerdo a lo anterior, la señal está representada en el enésimo nivel de descomposición por la siguiente expresión:

$$a_{V_{j-1}} f = \mathbb{P}V_j f + \mathbb{P}W_j f \tag{3.26}$$

En resumen, de acuerdo a la Ec. 3.12 y la Ec 3.26, una serie, señal o función puede ser reconstruida por la agregación de los enésimos niveles de resolución como:

$$\sum a_{V_{j-1}} = \sum_{j,k\in\mathbb{Z}} d_k \phi_k(t) + \sum_{j,k\in\mathbb{Z}} c_j \psi_k(t) \tag{3.27}$$

3.5.2. Momentos de Desvanecimiento

En efecto, por las condiciones del análisis multiresolución expuestas previamente, la función Wavelet que pertenece al subespacio V_j se jerarquizan en asocio al enésimo nivel de resolución de la señal analizada [Goswani y Chan, 2012].

Los momentos de desvanecimiento toman importancia en la reducción y/o compresión de la información, dado que la transformada de Wavelet de momento m para una función polinomial de grado m será cero. En ese sentido, se resalta que si el objeto de estudio presentase discontinuidades, saltos abruptos o perturbaciones propias de la misma, estos serán representados por coeficientes diferentes de cero [Burrus et al., 1998].

Definición 3.5.3. Sea una función $\psi_{j,k}(t)$, el momento enésimo de desvanecimiento l_m está dado por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} l^m \psi_{j,k}(t)dt = 0, \quad m = 0, \ldots, m-1 \tag{3.28}$$

Si cumple con las siguientes condiciones:

1. ψ_ω es diferenciable m veces en $\omega = 0$
2. ψ_ω y sus m–ésimas - 1 derivadas son cero en $\omega = 0$

3.5.3. Filtro de un nivel: Algoritmo de Mallat

Previamente, se ha evidenciado la relación de complementariedad entre el análisis multiresolución y las funciones Wavelet de acuerdo a la investigación desarrollada por [Mallat, 1989].

El algoritmo consiste en el análisis de una secuencia diádica a través de la aplicación de filtros de paso alto y paso bajo. Naturalmente se asocia estos filtros con los coeficientes de detalle y aproximación, respectivamente. Por lo tanto, el primero de estos permite la identificación de características particulares de la señal, mientras que los filtros asociados a los coeficientes Wavelet padre darán lugar a establecer condiciones generales del comportamiento de la misma [Acevedo Martinez, 2009]. En tal sentido, se destaca que la aplicación de la TDW conllevará a la decimación o submuestreo del objeto de estudio por $n/2$ a cada nivel de resolución y por la Ec. 3.27 se garantiza que la reconstrucción de esta conserve la misma cantidad de datos iniciales.

3.5.4. Familia de Funciones Wavelet

Las funciones Wavelet son generadas a partir de traslaciones y dilataciones de la función Wavelet madre general que forman un conjunto ortonormal de funciones. En ese sentido, cabe resaltar que estas funciones cumplen con las siguientes características generales:

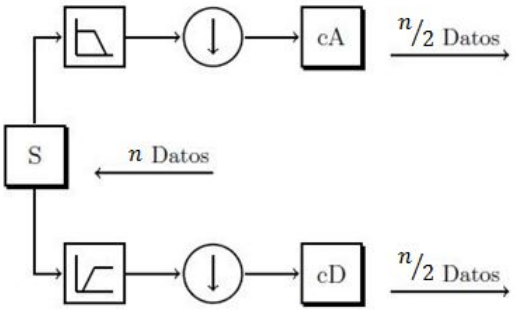


Figura 3.6: Esquema aplicación de transformada de Wavelet. Modificado de [Acevedo Martinez, 2009]

1. Soporte compacto de la función Wavelet madre.
2. Simetría
3. Momentos de desvanecimiento
4. Regularidad

Función Wavelet Haar

Es propuesta por Alfred Haar hacía 1910, corresponde a la función más simple en el procesamiento y cuyo soporte es el más pequeño frente a las diferentes Wavelet. En el sentido de su simpleza, esta función no es adecuada para aplicarse a una señal con fluctuaciones, variaciones y/o discontinuidades que deban ser suavizadas, dado que se expresa únicamente en un momento de desvanecimiento por la siguiente expresión.

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1 \\ 0, & \textit{cualquier otro caso} \end{cases} \tag{3.29}$$

Función Wavelet Daubechies

Esta función fue propuesta por Ingrid Daubechies y en la actualidad tiene gran acogida en varios campos del conocimiento, ya que son de soporte compacto y cuenta con 20 momentos de desvanecimiento, permitiendo el desarrollo del análisis multiresolución de la señal.

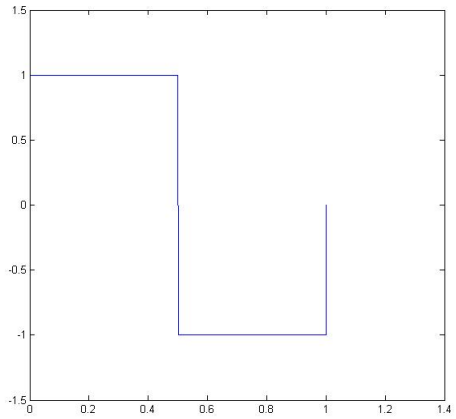


Figura 3.7: Wavelet madre de *haar*

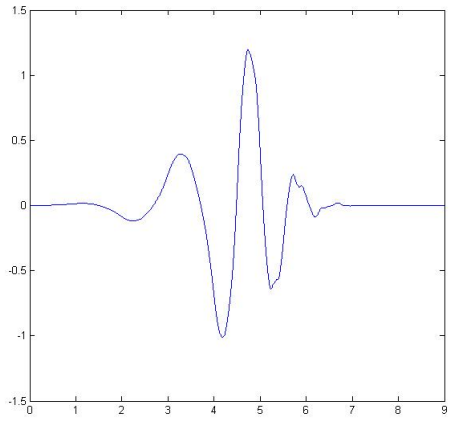


Figura 3.8: Wavelet madre *Daubechies 4*

Función Wavelet Symmlets

Al igual que las funciones presentadas anteriormente, estas fueron propuestas por Daubechies y principalmente se diferencian por el mejoramiento en la simetría y soporte compacto de las mismas. Por otra parte, similar al caso anterior, esta tiene enésimos momentos de desvanecimiento que se definen por el tamaño del soporte.

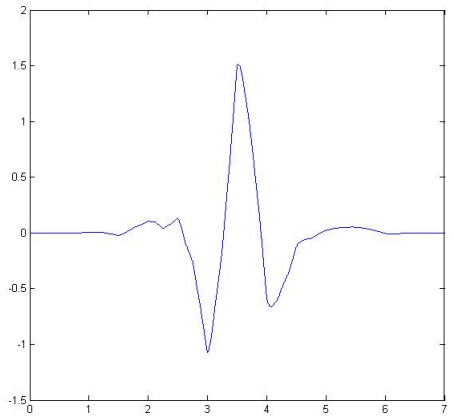


Figura 3.9: Wavelet madre *Symmlets 4*

Función Wavelet Coiflets

Son propuestas por Ronald Coiflets, cuyo principal ventaja radica en la asociación de la función Wavelet madre m con la m-ésima función de escalamiento o Wavelet padre. Así también el mejoramiento de la simetría y el soporte compacto de las funciones.

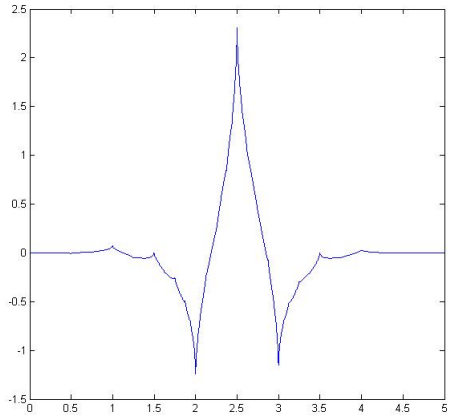


Figura 3.10: Wavelet madre *Coiflets 1*

Capítulo 4

Datos y Métodos

4.1. Zona de Estudio

El municipio de La Vega, fue escenario de un movimiento telúrico, el 30 de septiembre de 2012 con una magnitud de 7,1° en la escala de Richter, según datos del Servicio Geológico Colombiano y del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Este municipio del sur occidente colombiano hace parte del departamento del Cauca, y su cabecera municipal se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas: Longitud: $76°49'39{,}2''\ W$, Latitud: $2°3'41{,}69''\ N$. En la siguiente tabla se relacionan algunos aspectos del evento sísmico.

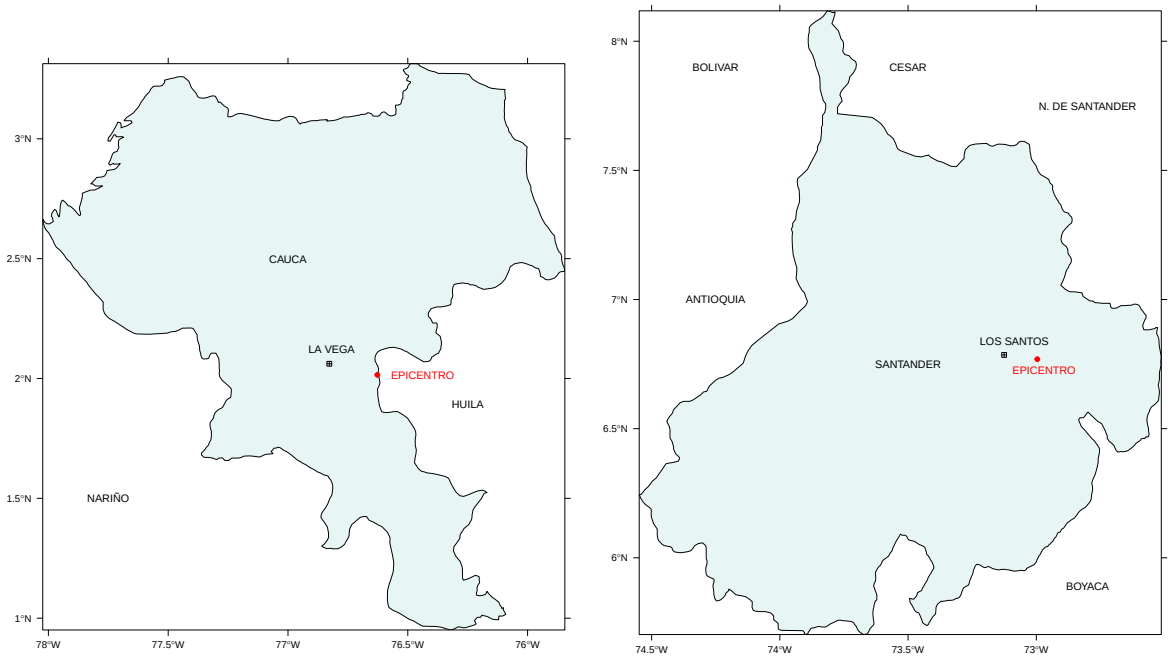
Característica	Detalle
Magnitud	7,1
Profundidad	172 km
Ubicación	1°58′23″N 76°33′29″W
Fecha	Septiembre 30 de 2012
Hora	16^h31^m UTC
Región	Sur Occidente Colombia

Cuadro 4.1: Características del evento sísmico. La Vega, Cauca

De otra parte, en el municipio de los Santos, se registró actividad sísmica el 10 de marzo del 2015 con una magnitud de 6,2° en la escala de Richter, según datos Servicio Geológico Colombiano. Este municipio hace parte del departamento de Santander al nororiente del país y se encuentra en las siguientes coordenadas geográficas: Longitud: $73°7'31,53\ W$, Latitud: $6°47'7,99''\ N$. En la siguiente tabla se relacionan algunos aspectos del movimiento telúrico.

Característica	Detalle
Magnitud	6.2
Profundidad	157.9 km
Ubicación	6°46′8″N 72°59′46″W
Fecha	Marzo 10,2015
Hora	20^h55^m UTC
Región	Norte Oriente Colombia

Cuadro 4.2: Características del evento sísmico. Meseta de los Santos, Santander



(a) Epicentro del terremoto, Municipio La Vega (b) Epicentro del movimiento telúrico, Municipio de los Santos

Figura 4.1: Ubicación geográfica de sismos objeto de estudio

A continuación se presenta una síntesis de la formación geológica de la zona norte y occidental del continente suramericano. El país es afectado por la convergencia entre la placa de Nazca, Continental y Caribe que por procesos de subducción ha dado lugar a la formación del sistema montañoso que atraviesa longitudinalmente al país [Sanchez-Rojas y Palma, 2014]. De la subducción entre la placa de Nazca y la Continental, cabe resaltar que tiene un movimiento anual de aproximadamente $7cm/año$ [Taboada et al., 1998], por lo cual, ha generado la formación de arcos volcánicos sobre la cordillera central que se

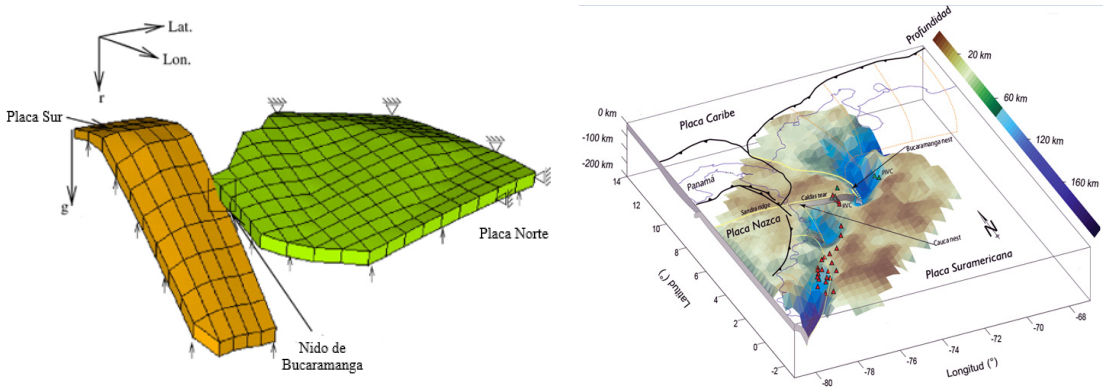
clasifican en tres grupos principalmente: al norte conformado por el Parque Natural de los Nevados, la sección central formado por el Nevado del Huila, el volcán de Puracé y Doña Juana, por último en el sector sur, el volcán Galeras-Cerro Negro. De otra parte, el proceso de convergencia entre la placa Continental y Caribe tiene un movimiento anual aproximado de $1 - 2cm/año$ [Taboada et al., 1998], que a diferencia del caso anterior no presenta formaciones vulcanológicas. Sin embargo, ha deformado la región norte y provoca esfuerzos en las fallas geológicas del nororiente del país.

Del primer caso de estudio a desarrollar, es de mencionar que se encuentra sobre la falla romeral que se extiende longitudinalmente sobre el país; esta se constituye como elemento diferenciador de terrenos de afinidad oceánica que forma la estructura de la coordillera occidental del sistema montañoso central que está conformado por rocas tanto sedimentarias como de origen volcánico [López et al., 2009]. Los sistemas de fallas de la región tienen su origen en la reactivación de movimientos tectónicos que tuvieron lugar durante el cretaceo y el terciario; más aún por el continuo desplazamiento tectónico de la placa de Nazca y Continental mencionado previamente. Se destacan, al este de la cordillera oriental, las falla Cauca-Patía con dirección NNE, mientras que al oeste de la falla principal se encuentra la falla del Tambor y Junín-Sambiambí con cabalgamiento al occidente.

Para el sismo en el municipio de los Santos, Santander, sus condiciones geológicas son heredadas de antiguas fallas normales en dirección NE-SW y NS, y accidentes mayores que afectan el basamento de la cordillera oriental. Se destaca principalmente la compresión por la acción de la placa Caribe bajo la placa Continental Suramericana que genera un movimiento de rumbo a lo largo de la falla Santa Marta - Bucaramanga, provocando la aparición del nido de Bucaramanga; sobre este [Zarifi et al., 2007] sostiene a partir del estudio de sismicidad local la existencia de una subplaca que proviene desde el norte cuyo movimiento es NS y en sentido contrario otra desde el sur que provocan colisiones reiterativas en la profundidad del nido a 155 km aproximadamente, por lo que se concluye que este fenómeno geológico obedece a movimientos tectónicos y se caracteriza por tener una alta actividad sísmica que persiste en el tiempo [Prieto et al., 2012]. Recientemente, el departamento de geofísica de la Universidad Nacional de Colombia junto con la Universidad de Texas, dieron a conocer un nuevo modelo de fallas geológicas del país, en donde se indica la existencia de una falla transversal que recorre desde el departamento del Choco, pasando a través de la región andina y que se encontraría con el nido de Bucaramanga (Dirección EW), dicha falla geológica tiene por nombre *Caldas Tear* [Vargas y Pedraza, 2011]. De allí, la alta actividad sísmica que se presenta en esta región del país.

4.2. Insumos

Dentro de los requerimientos para el desarrollo de esta investigación, se desglosa esta sección en dos elementos principalmente que se presentan a continuación:



(a) Estructura geológica de nido de Bucaramanga. Modificado de [Zarifi et al., 2007]

(b) Esquema geológico de fallas principales del país. Tomado de [Vargas y Pedraza, 2011]

Figura 4.2: Esquema de estructura geológica del Nido de Bucaramanga

4.2.1. Datos GNSS

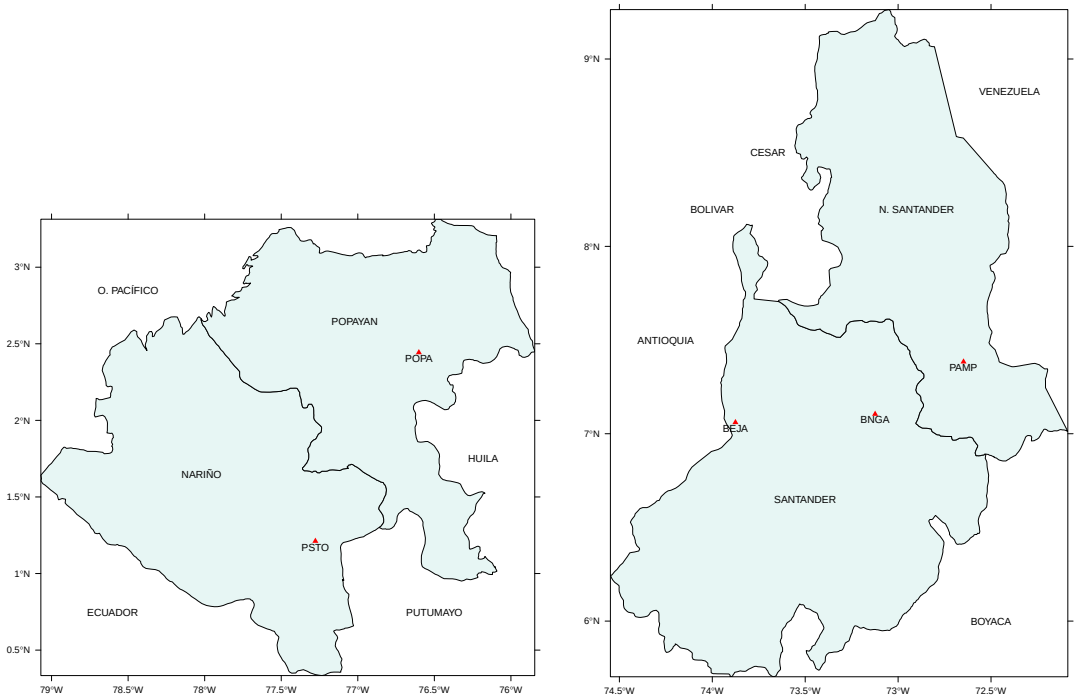
En el siglo pasado, Colombia tenía designado un sistema de coordenadas locales horizontal referidas al elipsoide internacional *Hayford*, sistema que por definición no era geocéntrico, es decir, el origen no estaba ajustado al centro de masa de la tierra, su eje Z no coincidía con el primer meridiano, el plano XY no se ajustaba con el plano ecuatorial, entre otras características físicas y geométricas del elipsoide; más aún la medición de la altura H se realizaba a partir de la altura media del mar y con una reducción de la misma hasta el geoide, por ello, la redes geodésicas desarrolladas en el país carecían de precisión dado que un vector de coordenadas (ϕ, λ) vinculado al elipsoide de referencia no era posible asociarlo a una altura H referida a otra superficie, generando así, errores de cientos de metros en el vector (ϕ, λ, H).

En tal sentido, el país migra de su sistema local de coordenadas a un sistema global en el cual la medición de las componentes de un vector (X, Y, Z) estarán asociadas a la misma superficie de referencia, siendo esta un elipsoide biaxial denominado WGS84 (*World Geodetic System*). Por consiguiente, el origen de coordenadas es geocéntrico, el eje Z corresponde al primer meridiano de Greenwich, el plano XY coincide con el plano ecuatorial, entre otras características físicas como la velocidad angular de rotación, la masa contenida en el elipsoide, el potencial gravitacional, etc.

Este cambio de Datum, estuvo asociado al establecimiento de una red de estaciones GPS de alta precisión en el continente suraméricano, denominada **SIRGAS** (*Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*); en lo concerniente al país, se designo a esta nueva red de estaciones de rastreo continuo como **MAGNA - ECO** (*Marco Geocéntrico Na-*

cional de Referencia).

Por lo anterior, para el desarrollo de la presente investigación en el caso de La Vega, Cauca se han seleccionado estaciones de rastreo continuo pertenecientes a la red MAGNA - ECO, de las cuales se obtuvieron los archivos RINEX para el periodo comprendido entre el día 259 (Septiembre 15 de 2012) y el día 289 (Octubre 15 de 2012), encontrándose estas estaciones en un radio entre [0, 150]km aproximadamente alrededor del epicentro del sismo. Dichas estaciones GPS se encuentran en: Popayan (POPA) capital del departamento de Cauca y en Pasto, capital del departamento de Nariño, Pasto (PSTO). (Ver Figura 4.3(a) y Tabla 4.3)



(a) Estaciones analizadas, La Vega (b) Estaciones analizadas, Los Santos

Figura 4.3: Estaciones analizadas en los casos de estudio

Así también, para el caso de estudio Los Santos, Santander, se seleccionaron los archivos RINEX de la estación de rastreo continuo GPS ubicada en Barrancabermeja (BEJA), en la capital del departamento de Santander, Bucaramanga (BNGA) y en la ciudad de Pamplona, Norte de Santander (PAMP); en un periodo de tiempo comprendido entre el día 054 (Febrero 23 de 2015) y el día 084 (Marzo 25 de 2015) (Ver Figura 4.3(b) y Tabla 4.4).

ESTACIONES	COORDENADAS		DISTANCIA AL EPICENTRO
POPA	$2,4431°\ N$	$76,6012°\ W$	147,42 km
PSTO	$1,2117°\ N$	$77,2770°\ W$	114,57 km

Cuadro 4.3: Coordenadas geográficas seleccionadas para el estudio de caso, La Vega, Cauca

ESTACIONES	COORDENADAS		DISTANCIA AL EPICENTRO
BEJA	$7,0606°\ N$	$73,8755°\ W$	102,40 km
BNGA	$7,1049°\ N$	$73,1237°\ W$	39,73 km
PAMP	$7,3841°\ N$	$72,648°\ W$	78,14 km

Cuadro 4.4: Coordenadas geográficas seleccionadas para el estudio de caso, Los Santos, Santander

4.2.2. Software

GPS-RINEX –>TEC.

Desarrollado por el PhD en física Gopi Seemala, investigador del Instituto hindú de geomagnetismo. Este software de uso libre se utilizó para el procesamiento de los archivos RINEX de las estaciones de rastreo continuo y así obtener el Contenido Total de Electrones presente en la ionosfera en los periodos establecidos. Básicamente el software requiere únicamente del fichero RINEX de observación y navegación; este está en condiciones de descargar automáticamente las efemérides del sitio Web de IGS (International GNSS Service) correspondientes a la época de observación para el posterior calculo de la variable en cuestión

MATLAB.

Esta casa matriz fundada en 1984, es reconocida como una de los software más potentes para el procesamiento de datos en diversos ámbitos de la investigación, tiene un amplio uso de investigadores e ingenieros; sin embargo la difusión y utilización del mismo ha decaído dada la creciente oferta de software de uso libre que actualmente se encuentran disponibles en la red. Este ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación basado en C. Se implementaron rutinas de Matlab para el procesamiento del Contenido Total de Electrones y su variabilidad en el tiempo, aplicación de la transformada de Wavelet, análisis estadístico y producción gráfica.

R Statistics:

Nace como software de uso y desarrollo libre, se constituye como un entorno y lenguaje de programación, no obstante a lo largo de los años se ha venido implementando una nueva alternativa denominada *R Studio*, entorno un tanto más amigable con los usuarios pero que conserva la misma esencia. Por lo tanto, se desarrollaron rutinas para la construcción de mapas de interpolación espacial VTEC por medio del método *Kriging ordinario*, el análisis descriptivo de la variable analizada y sus respectiva producción gráfica.

4.3. Metodología

En la Figura 4.3 se presenta la metodología desarrollada en la presente investigación.

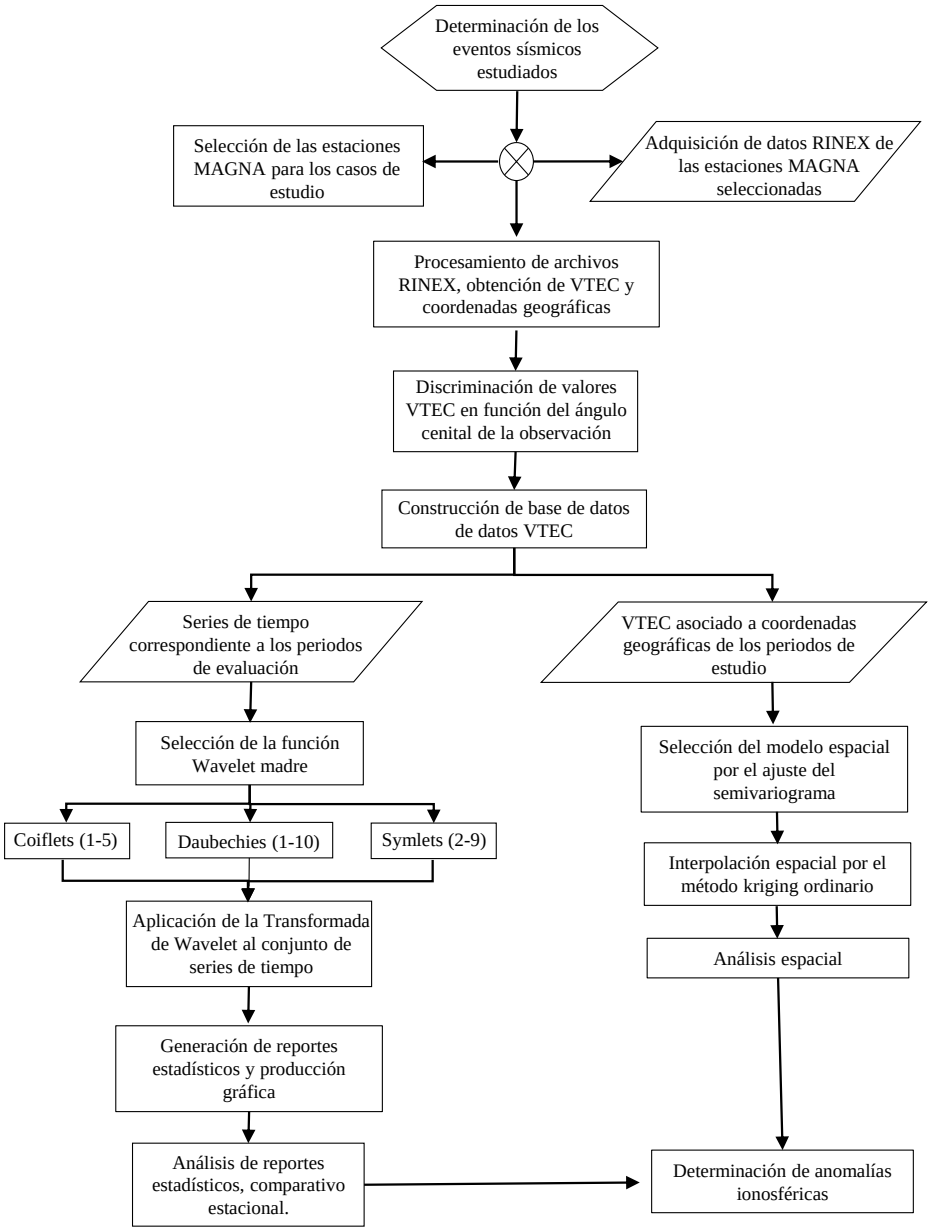
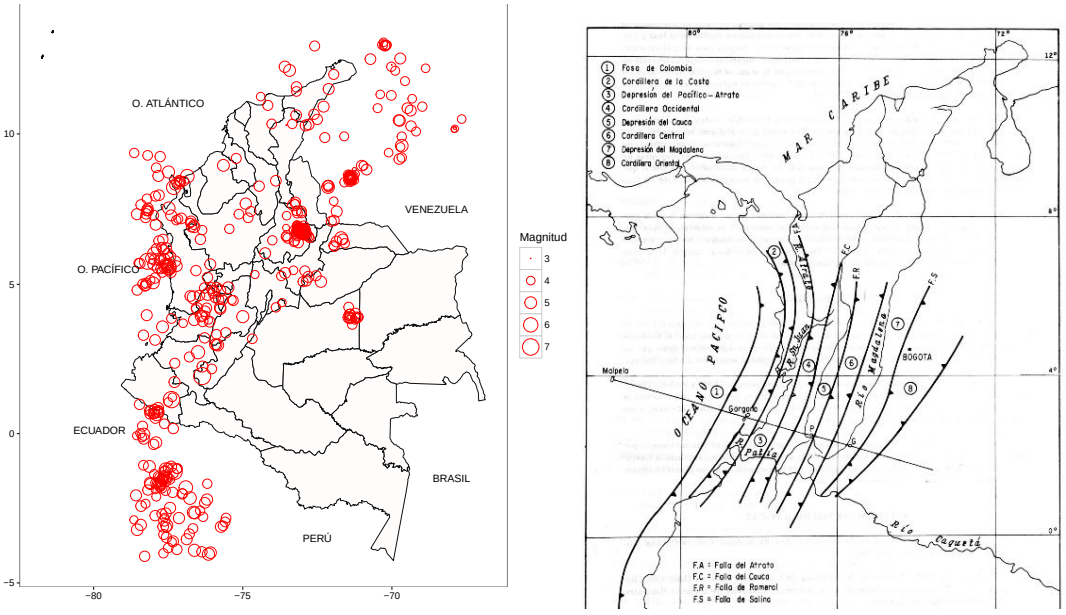


Figura 4.4: Metodología desarrollada.

4.3.1. Definición de casos de estudio

Se toman como casos de estudio los sismos relacionados previamente por la magnitud de los mismos como factor preponderante en su elección; de otra parte la configuración tectónica del país, así como las fallas geológicas que tienen lugar allí y que corresponden a elementos primordiales en las formaciones montañosas que se observan principalmente desde el sur occidente con la coordillera de los Andes y que en dirección NE, más exactamente en el nudo de los pastos se trifurca, representando para el país diversidad geomorfológica del espacio geográfico. Cabe resaltar que dichos elementos formadores del paisaje son en efecto desafíos en el entendimiento de la estructura geológica de la región y así también lo es para la probable determinación previa ocurrencia de eventos sísmicos, dado que los reportes de sismicidad de esta zona del país presentan una alta recurrencia de eventos con variabilidad en la magnitud y profundidad. Hacía el oriente del país, el cratón amazónico colindante con la coordillera oriental presenta los menores índices de ocurrencia de eventos sísmicos en la segunda década del siglo XXI, sin embargo se destaca la ocurrencia de fenómenos de este tipo en inmediaciones del piedemonte llanero, el evento de mayor magnitud ocurrido tuvo lugar en el municipio de Calvario, Meta en Mayo 24 de 2008 con una magnitud de 5,6° en la escala de Ritcher y una profundidad de 3,9km.



(a) Mapa de sismicidad de Colombia 2010 - 2015

(b) Fallas geológicas de Colombia Tomado de: [Acosta, 1986]

Figura 4.5: Mapa de actividad sísmica y fallas geológicas en Colombia

Se hace hincapié en la ocurrencia reiterativa de eventos sísmicos principalmente sobre las

fallas geológicas del país, de acuerdo a la Figura 4.5(a) y 4.5(b) la sección longitudinal desde el sur occidente colombiano (Entre los departamentos de Cauca y Huila) hasta el extremo norte de la coordillera oriental en el departamento de Antioquia se denominada *Falla de Romeral* que durante la segunda década del siglo XXI ha presentado movimientos telúricos en varias magnitudes, resaltándose el terremoto en el municipio de la Vega, Cauca.

En ese mismo sentido, el nido de Bucaramanga por su estructura geológica la recurrencia de eventos sísmicos es mayor a la registrada en la Falla de Romeral y teniéndose en cuenta el descubrimiento de la falla geológica *Caldas Tear* mencionada previamente que hace parte de este complejo sistema de fallas, por lo que entre 2010 y 2015 fueron registrados 200 terremotos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Por ello es escogido este movimiento telúrico que tuvo lugar en el municipio de los Santos, Santander dado que presenta la mayor magnitud registrada en dicho periodo.

4.3.2. Procesamiento de archivos RINEX

El procesamiento de los archivos RINEX está encaminado a obtener el Contenido Total de Electrones Vertical, sus coordenadas y su época de observación, principalmente. Para ello, se obtuvieron los ficheros de observación (XXXXDIAF*YYo) y navegación (XXXX-DIAF*YYN) que se describirán a continuación.

Los ficheros RINEX de observación están compuestos por dos secciones:

1. La cabecera del fichero tendrá los siguientes elementos:

2. En la segunda sección del fichero se encuentran principalmente las pseudo distancias en la frecuencia L1 y L2, junto con su respectiva modulación.

Respecto al fichero RINEX de navegación contiene identificación de cada satélite por su código PRN, parámetros del reloj del satélite, parámetros orbitales, además la precisión de las medidas de pseudo distancias obtenidas en la observación. En el Cuadro 4.6 se relacionan otros elementos.

Por otra parte, las efémerides son ficheros que permiten calcular los planos orbitales y el movimiento de los satélites sobre estas. Estos archivos son distribuidos en 3 tipos:

1. Almanaques: Son actualizados en periodos de 6 días y contiene parámetros fundamentales de las órbitas keplerianas, correcciones de relojes, donde dichos elementos se encuentran consignados en los archivos de navegación previamente descritos y cuya precisión es del orden de kilómetros.

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION	Versión del fichero RINEX y tipo
PGM/RUN BY/DATE	Programa de compilación del fichero
MARKER NAME	Nombre de la estación
MARKER NUMBER	Número del punto de observación.
OBSERVER/AGENCY	Agencia que captura los datos.
REC# /TYPE/VERS	Número del receptor, tipo y versión.
ANT# /TYPE	Número de antena y tipo.
APPROX POSITION XYZ	Posición de la antena
WAVELENGTH FACT L1/2	Factores de observación para L1 y L2
# / TYPES OF OBSERV	Medidas de fase, código y doppler.
COMMENT	Modulación de la observación.

Cuadro 4.5: Descripción de los elementos de la cabera del fichero RINEX de observación

```
     2.11           OBSERVATION DATA    G (GPS)             RINEX VERSION / TYPE
teqc  2012Jun6                          20150224 19:38:23UTCPGM / RUN BY / DATE
Linux2.6.22.18|i686|gcc|Win32-mingw32|=                     COMMENT
teqc  2012Jun6                          20150224 19:30:39UTCCOMMENT
teqc  2012Jun6                          20150224 19:28:06UTCCOMMENT
     2.10           OBSERVATION DATA    G (GPS)             COMMENT
TPS2RIN 9.5p1       IGAC                23-FEB-15 13:14     COMMENT
build Mar 16 2012 (c) Topcon Positioning Systems            COMMENT
C:\Program Files (x86)\Topcon\TopNET\BERR0223k              COMMENT
BERR                                                        MARKER NAME
41910S001                                                   MARKER NUMBER
                    Instituto Geografico Agustin Codazzi    OBSERVER / AGENCY
8RT7OUW8ZY8         TPS GB-1000         3.3 Jul,10,2008 p4  REC # / TYPE / VERS
2650160             TPSCR4          CONE                    ANT # / TYPE
  1703222.6752 -6104500.3932   716437.5657                  APPROX POSITION XYZ
        0.0000        0.0000        0.0000                  ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
    15.0000                                                 INTERVAL
     7    C1    P1    P2    L1    L2    D1    D2            # / TYPES OF OBSERV
SE TPS 00000000                                             COMMENT
Forced Modulo Decimation to 15 seconds                      COMMENT
  2015     2    23    10    48    0.0000000     GPS         TIME OF FIRST OBS
                                                            END OF HEADER
 15  2 23 10 48  0.0000000  0  3G05G13G15
  21203892.201                                  111427202.153 7
      6746.917
  20505894.555                                  107759194.801 8
      9952.059
  21829771.640                                  114716205.595 7
     11588.305
 15  2 23 10 48 15.0000000  0  9G02G05G06G12G13G15G17G24G25
  22003383.152    22003382.0304   22003383.2004  115628553.200 7  90100180.72945
      9392.712        7318.998
  21184624.558    21184625.0514   21184627.0394  111325950.557 8  86747503.18046
      6751.826        5261.179
  23451780.560                                  123239927.092 6
```

Figura 4.6: Fichero RINEX de observación de la estación BERR del día 054 de 2015

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION	Versión del fichero RINEX y tipo.
PGM/RUN BY/DATE	Programa de compilación del fichero
ION ALPHA	Parámetros ionosféricos A0 - A3
ION BETA	Parámetros ionosféricos B0 - B3
TIME SYSTEM COOR	Sistema de referencia de tiempo

Cuadro 4.6: Descripción de los elementos de la cabera del fichero RINEX de navegación

2. Efemérides transmitidas: Son calculadas por centros de procesamiento en tierra y se transmiten al conjunto de satélites, cuya precisión está en el orden de unidades métricas; estará compuesto por términos de perturbación por la forma elipsoidal de la tierra, efectos por mareas y presión solar.

3. Efemérides precisas: Este fichero (igsWWWd.SP3, donde WWW corresponde a la semana GPS y d al día de la semana) está disponible en el IGS (International GNSS Service) y son generadas a posteriori de la observación, en un periodo de aproximadamente 12 a 15 días. Consiste en un proceso inverso, donde se conocen coordenadas en tierra y se requiere definir la posición del satélite para respectivas correcciones. La precisión de este fichero para el procesamiento de datos es del orden de centímetros.

Ahora bien, dados los elementos presentados, se calcula el Contenido Total de Electrones por la diferencia entre las frecuencias de la señal como se describió en capítulos anteriores establecidas en el archivo de observación, por otro lado, a partir de las efemérides y ficheros de navegación son calculadas las órbitas satelitales, en ese sentido se proyectan el corte del rayo electromagnético con la ionosfera y por dichas condiciones de la observación su perpendicularidad a la misma, sobre el cual se establece un vector de coordenadas $(\phi, \lambda, VTEC)$ (Aspectos del cálculo de órbitas satelitales están descritos en [Palacios, 2010]).

4.3.3. Discriminación de valores VTEC en función del ángulo cenital

Conociendo los parámetros orbitales, la posición de los satélites da lugar a valores asociadas a la época de observación y por supuesto a cada PRN tales como: azimuth y ángulo cenital; respecto a este último y considerando la Ecu. 2.29, cabe resaltar que aquellos que se encuentre entre el horizonte del observador y los 15° de elevación, presentarán 3 veces mayor error que aquellos más cercanos al cenit [Sardón et al., 1993]. Bajo este criterio se

excluyen del análisis dichos datos, teniendo en cuenta únicamente valores de VTEC en el intervalo $[15° - 90°]$ de elevación sobre el horizonte.

4.3.4. Selección de la función Wavelet Madre

La selección de la función Wavelet madre deberá estar ajustada a las características propias de la señal; en el caso del Contenido Total de Electrones y su variabilidad en el tiempo, dicha función estará encaminada a identificar de manera correcta aquellas frecuencias altas ocurridas en cortos periodos de tiempo junto con oscilaciones de baja frecuencia que tienen largas duraciones. Cabe resaltar que esta transformada ofrece la posibilidad de reducir o eliminar el ruido de la señal permitiendo un submuestreo de la misma pero que conserva sus características representadas a través de los coeficientes de aproximación y detalle.

En tal sentido, dentro del amplio espectro de ofrece las funciones madre de la transformada de Wavelet, se escogieron para el análisis la función *Daubechies* con los momentos de desvanecimiento entre 1 al 10, la función de *Coiflets* con momentos entre 1 al 5 y la función de *Symlets* con momentos entre 2 y 9 que serán evaluadas bajo el criterio de la conservación de la energía de la señal.

Acudiendo al Capítulo 3, la aplicación de la transformada de Fourier a una señal da lugar a coeficientes espectrales en el dominio de la frecuencia, por lo tanto, la energía de la señal deberá estar representada en la suma de los cuadrados de dichos coeficientes, denominado el *Teorema de Parseval.*

$$\frac{1}{N}\sum |f(t)|^2 = \sum |b_k|^2 \tag{4.1}$$

Por consiguiente, pasando del dominio de la frecuencia al dominio tiempo - escala, este teorema será expresado en términos de los coeficientes de aproximación y detalle [Rivas Trujillo, 2009] que en el mismo sentido deberán conservar la energía de la señal asociado a las respectivas funciones Wavelet madre con las cuales se experimentó.

$$\frac{1}{N}\sum |f(t)|^2 = \sum_{j,k\in\mathbb{Z}} |d_k|^2 + \sum_{j,k\in\mathbb{Z}} |c_j|^2 \tag{4.2}$$

De otra parte, es de señalar que se extrajo una muestra sin reemplazamiento para la experimentación de la población de series analizadas en cada uno de los casos de estudio, con el fin de establecer las función Wavelet madre adecuada, bajo la siguiente expresión:

$$n = \frac{ZpqN}{Ne^2 + Z^2pq} \tag{4.3}$$

Donde, Z es el nivel de confianza de la muestra, N el tamaño de la muestra, e error máximo permitido; respecto a p y q, corresponde a un valor estimado del parámetro establecido en otros experimentos. Por lo tanto, la función Wavelet madre será elegida

4.3.5. Aplicación de la Wavelet Madre, Generación de reportes estadísticos

Considerando la conservación de la energía luego de la aplicación de las diferentes funciones Wavelet madre, se extrapola este resultado a la población de estudio. De acuerdo a los conceptos descritos en el Capítulo 3, en la series analizadas serán resaltados aquellos sucesos de alta frecuencia que tienen lugar en cortos periodos de tiempo y corresponderán a las anomalías ionosféricas locales, además se elimina el ruido de las mismas en función de los momentos de desvanecimientos, para este caso es de señalar que se ha escogido el momento de desvanecimiento 4 de la función Wavelet madre *Coiflets*. Para el análisis detallado de la serie de tiempo, se ha evaluado la misma con estacionalidad horaria y estimando el valor de los medidas de tendencia y dispersión de los datos, esto con el fin de la construcción de matrices de análisis del Contenido Total de Electrones:

1. Promedio aritmético: Indica el valor hacía el cual se agrupan los datos. Esta dado por la expresión:

$$\overline{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{4.4}$$

2. Coeficiente de Variación: Es una medida de variabilidad relativa de los datos que relaciona la desviación estándar con el promedio aritmético.

$$cv_{\overline{x}} = \frac{s_x}{\overline{x}} \tag{4.5}$$

4.4. Análisis Espacial

De acuerdo a lo mencionado en la sección 2.2, durante el transito de un satélite k sobre la esfera de observación realizará enésimas mediciones, además de ello dichas medidas están asociadas a una tupla de coordenadas ϕ, λ, vector de coordenadas que está referido al elipsoide *WGS84*, sin embargo se requiere proyectar el conjunto de tuplas a un sistema de coordenadas cartesiano *Este, Norte*, dado que la implementación del método *kriging ordinario* requiere establecer básicamente la distancia entre las mediciones realizadas para la posterior estimación de los valores no medidos. Así también, se agrupa la información en intervalos de 1 hora en donde además son involucradas las estaciones asociadas a los casos de estudio a desarrollar. De esta forma se procede a la construcción de interpolaciones espaciales permitiendo así determinar la aparición espacial de las anomalías ionosféricas.

4.4.1. Construcción de mapas VTEC

La estimación del semivariograma experimental se obtuvo por medio de la función *variogram* del paquete **gstat** y de esta forma evidenciar el grado de dependencia entre observaciones, sin embargo es necesario establecer los parámetros y el correspondiente ajuste a

cualquiera de los modelos teóricos existentes. Esta estimación y ajuste principalmente se lleva a cabo por el método de mínimos cuadrados o métodos de máxima verosimilitud. De acuerdo a lo anterior, cabe resaltar en primer lugar que no se desarrollan a profundidad los conceptos propios de la estadística espacial por alejarse diametralmente con los objetivos perseguidos en esta investigación, siendo que no basta mencionar que el ajuste del modelo es llevado a cabo principalmente por métodos de máxima verosimilitud y mínimos cuadrados que se encuentran implementados y fueron llevados a cabo a través de la función *autofitvariogram* del paquete *automap*.

Entonces, la función mencionada llevo a cabo la determinación de los parámetros y la estimación de la función analítica de un conjunto de modelos teóricos, dentro los cuales se encuentran:

1. Lineal
2. Esférico
3. Exponencial
4. Gaussiano

Habiendo obtenido la estructura espacial de la variable VTEC, resta por hacer uso del interpolador para la predicción de la misma en los puntos donde no fue medida; el proceso consiste básicamente en estimar el valor de la variable en $Z(s_x s_y)$ a partir de los valores conocidos de la variable en la región de interés.

Sentido en el cual se hace uso del interpolador *kriging ordinario*, a consecuencia de desconocer los supuestos de existencia de estacionariedad y media constante sobre la región de estudio, esto en el mismo sentido expuesto anteriormente, donde dichos conceptos no se profundizan. Por lo tanto, se concentra especial atención encontrar los pesos φ_i que minimizan el error cuadrático medio asociado a la predicción. El predictor estará asociado a la siguiente expresión:

$$\widehat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \varphi Z(s_i) \tag{4.6}$$

Capítulo 5

Resultados y Discusiones

Se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los casos de estudio desarrollados en esta investigación; en tal sentido, se expone el análisis del comportamiento que registra el Contenido Total de Electrones en los periodos de tiempo estudiados, más exactamente desde la perspectiva de estacionalidad diaria y permitiéndose la construcción de los correspondientes comparativos entre días objeto de estudio, fundamentalmente y con el fin de evidenciar los cambios significativos que presenta la ionosfera; así también se presentan desde un enfoque espacial la variación VTEC de este fenómeno en intervalos de 1^h, construyendo mapas de predicción espacial y de esta forma establecer las regiones sobre las cuales la ionosfera presenta anomalías y que son referidas a sucesos sísmicos. Téngase en cuenta que se hace inadecuado la inclusión de la totalidad del conjunto de gráficos y reportes obtenidos en el procesamiento de la información dado por la magnitud del mismo que haría extenso este documento, sentido por el cual se presentan los resultados más relevantes encontrados en este estudio. Cabe resaltar que el comportamiento, los eventos y demás discusión de los resultados serán presentados en UTC (Tiempo Universal Coordinado).

5.1. Preprocesamiento de las Series de Tiempo

Es común a los casos de estudio analizados, la determinación del Contenido Total de Electrones en la ionosfera a partir de los archivos RINEX (Observación y Navegación), las efemérides y el proceso descrito en la sección 2.2, siendo este reiterativo dado que las pseudodistancias son obtenidas en función a una tasa de rastreo. Por la Figura 5.1 se obtuvieron de dicho proceso las siguientes variables: Época de observación, azimuth y elevación del satélite, STEC (TEC Inclinado), latitud y longitud asociadas al VTEC.

Entonces, al tomar el VTEC, época de observación y satélite visado se construyen los gráficos correspondientes al comportamiento del VTEC para un periodo en particular tal como se observa la Figura 5.2, donde se representan las mediciones realizadas por cada

"E:\Tesis\Datos\MesetadelosSantos, Santander\054\PAMP0540.15D\PAMP0540.15o"
7.38425 287.35222 2373.52591

Jdatet	Time	PRN	Az	Ele	Lat	Lon	Stec	Vtec	S4
2457076.500174	0.004167	1	194.81	11.40	-2.56	284.74	119.92	55.66	-99.000
2457076.500521	0.012500	1	194.66	11.52	-2.51	284.78	119.80	55.74	-99.000
2457076.500868	0.020833	1	194.51	11.64	-2.46	284.82	119.58	55.78	-99.000
2457076.501215	0.029167	1	194.36	11.76	-2.41	284.86	119.34	55.81	-99.000
2457076.501562	0.037500	1	194.20	11.88	-2.36	284.90	119.01	55.81	-99.000
2457076.501910	0.045833	1	194.05	12.01	-2.31	284.94	118.76	55.84	-99.000
2457076.502257	0.054167	1	193.90	12.13	-2.26	284.98	118.39	55.82	-99.000
2457076.502604	0.062500	1	193.75	12.25	-2.21	285.02	118.12	55.85	-99.000
2457076.502951	0.070833	1	193.60	12.38	-2.16	285.05	117.77	55.84	-99.000
2457076.503299	0.079167	1	193.45	12.50	-2.11	285.09	117.43	55.84	-99.000
2457076.503646	0.087500	1	193.30	12.62	-2.06	285.13	117.03	55.82	-99.000
2457076.503993	0.095833	1	193.15	12.75	-2.01	285.17	116.66	55.81	-99.000
2457076.504340	0.104167	1	193.00	12.88	-1.96	285.20	116.42	55.84	-99.000
2457076.504688	0.112500	1	192.85	13.00	-1.91	285.24	116.08	55.85	-99.000
2457076.505035	0.120833	1	192.70	13.13	-1.86	285.28	115.75	55.85	-99.000
2457076.505382	0.129167	1	192.55	13.26	-1.81	285.31	115.45	55.87	-99.000
2457076.505729	0.137500	1	192.40	13.38	-1.76	285.35	115.16	55.89	-99.000
2457076.506076	0.145833	1	192.25	13.51	-1.71	285.38	114.94	55.94	-99.000
2457076.506424	0.154167	1	192.11	13.64	-1.66	285.42	114.72	55.99	-99.000
2457076.506771	0.162500	1	191.96	13.77	-1.61	285.45	114.46	56.03	-99.000
2457076.507118	0.170833	1	191.81	13.90	-1.57	285.49	114.40	56.14	-99.000

Figura 5.1: Fichero VTEC, Estación Pamplona (PAMP 054)

satélite con un color específico.

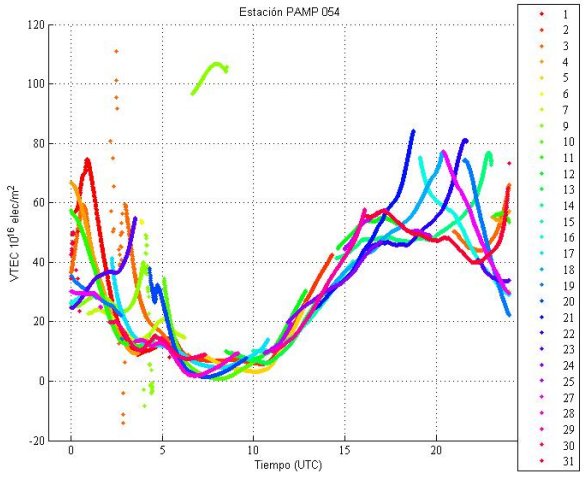
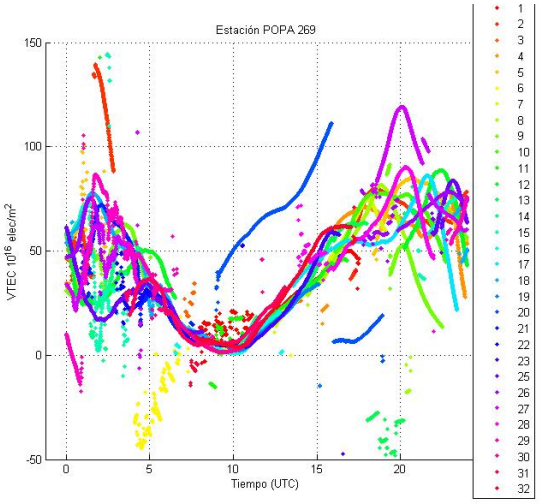


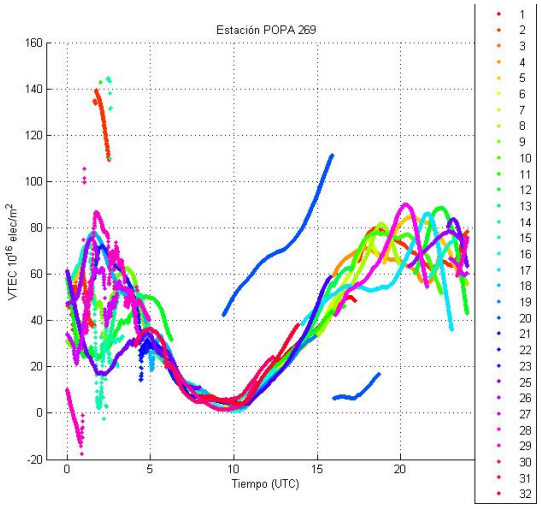
Figura 5.2: Contenido Total de Electrones Vertical. Estación Pamplona (PAMP 054)

Con el fin de mitigar el error dentro de la variable analizada, de acuerdo a [Sardón et al., 1993] se recurre a la exclusión del análisis aquellos valores de VTEC cuya elevación se encuentre entre $[0°, 15°]$ dado que su contenido de error es tres veces mayor que aquellos que se encuentran cercanos al cenit.

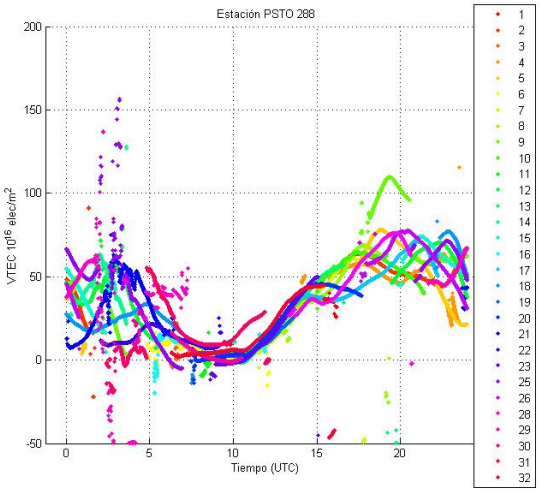
Se observa en la Figura 5.4 y 5.3 el desarrollo del VTEC para la estación POPA 269, PSTO 288, estación BEJA 063 y PAMP 054, las primeras 2 correspondientes al estudio



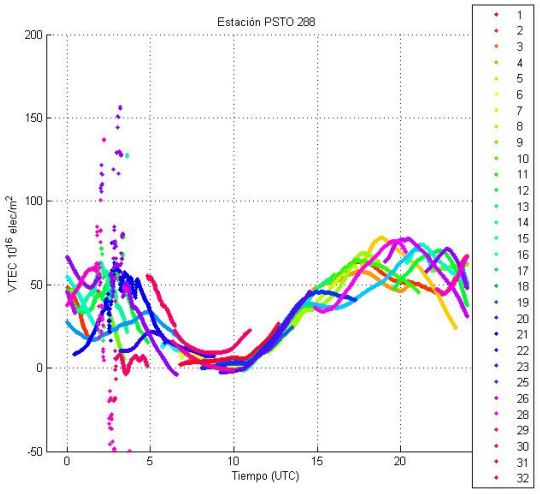
(a) Estación POPA 269 sin la discriminación respecto al ángulo cenital



(b) Estación POPA 269 con la discriminación respecto al ángulo cenital

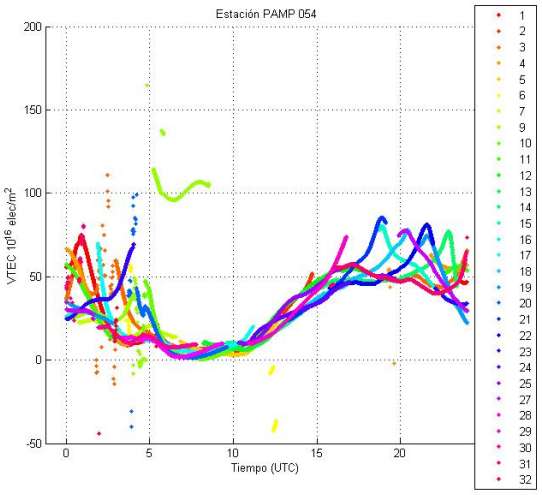


(c) Estación PSTO 288 sin la discriminación respecto al ángulo cenital

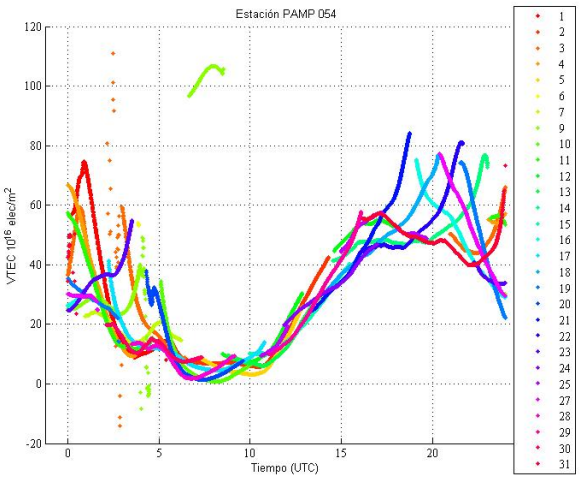


(d) Estación PSTO 288 con la discriminación respecto al ángulo cenital

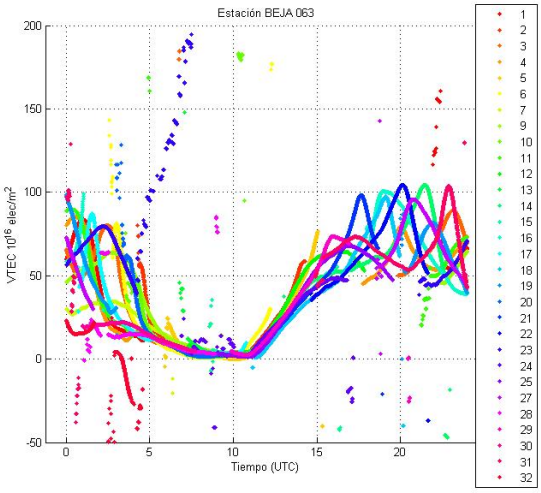
Figura 5.3: Estación POPA 269 y PSTO 288



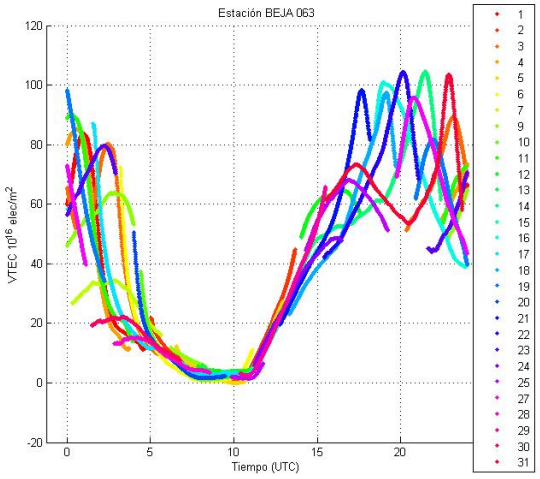
(a) Estación PAMP 054 sin la discriminación respecto al ángulo cenital



(b) Estación PAMP 054 con la discriminación respecto al ángulo cenital



(c) Estación BEJA 063 sin la discriminación respecto al ángulo cenital



(d) Estación BEJA 063 con la discriminación respecto al ángulo cenital

Figura 5.4: Estación PAMP 054 y BEJA 063

de caso La Vega, Cauca y las restantes al estudio de caso Los Santos, Santander. Al aplicar el criterio para la discriminación respecto al ángulo cenital sobre el conjunto de estaciones que hacen parte de esta investigación, se identifica la reducción de ruido en la variable VTEC, donde dicho ruido se presenta de manera aleatoria en el dominio de los $\Re$.

Para la estación POPA 269, se observa en la Figura 5.3(a) y 5.3(b) que los datos atípicos se encuentran distantes de la tendencia regular de los datos y que con la aplicación del criterio de segregación son eliminados; de otra parte, en cuanto al comportamiento registrado para la estación PSTO en el día 288 (Ver Figuras 5.3(c) y 5.3(d)) se observa la eliminación de ruido que registra una actuación similar al caso anterior.

Respecto a las estaciones del estudio de caso Los Santos, Santander, se encontraron diferencias para la estación PAMP 054 donde la comparación entre el comportamiento VTEC con aplicación del criterio de elevación y sin este (Ver Figuras 5.4(a) y 5.4(b)) para el periodo de tiempo en cuestión radica en la amplitud del intervalo de los datos, para el primer caso se observa un intervalo entre $[-50, 160]$, luego con la aplicación del criterio este intervalo se contrae hasta presentarse entre $[-15, 110]$ unidades de VTEC. Este mismo fenómeno de reducción del intervalo de los datos se presenta para la estación BEJA 063, que previo a la implemetación del criterio el intervalo se constituía entre $[-50, 200]$ VTEC, mientras que subsiguiente al procedimiento el intervalo se modificó a $[-20, 120]$ unidades de VTEC; así mismo, es de resaltarse a través del comparativo entre las Figuras 5.4(c) y 5.4(d) la eliminación de datos atípicos que se encontraban distantes de la tendencia que presentan los datos.

Los resultados analizados previamente son parcialmente homogéneos a la totalidad de las estaciones y días estudiados, bajo la premisa que la eliminación del ruido se presenta en diferentes niveles; por ejemplo, al observar la Figura 5.4(d) se encontró la eliminación parcial del ruido que contenía el VTEC en el tiempo, mientras que en la Figura 5.3(b) la sustracción de valores distantes a la tendencia se da prácticamente en su totalidad.

No obstante, se hace hincapié en que de acuerdo a la geometría de los satélites sobre la esfera de observación se obtendrán n pseudodistancias y por consiguiente la misma cantidad de valores VTEC; respecto a este último, presenta una variación espacial en función de la posición de los satélites en la época de observación.

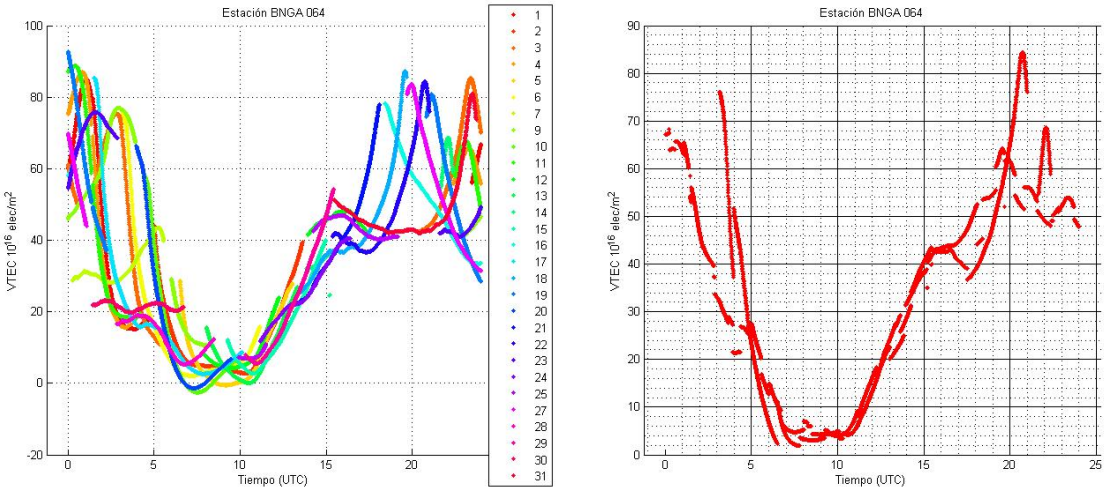
Por lo cual, se resalta en la Figura 5.5 la existencia heterogénea de valores VTEC en la misma época de observación, de acuerdo a lo mencionado en el párrafo previo; este hecho es causa de saturación en el procesamiento de la serie tiempo, para lo cual, dada la estructura de la información, se adolece de métodos que permitan realizar un análisis riguroso y por supuesto llegar a las conclusiones a las que haya lugar. Por lo tanto, se recurre a la aplicación de una media móvil, donde son promediados los valores VTEC que pertenecen a la misma época de observación y obteniendo un único dato para un tiempo

Jdatet	Time	PRN	Az	Ele	Lat	Lon	Stec	Vtec	S4
2457076,5	0	31	96,97	18,85	6,43	294,71	52,19	34,42	-99
2457076,5	0	3	226,48	22,12	2,92	282,67	52,7	36,57	-99
2457076,5	0	9	318,49	24,74	11,73	283,41	27,18	25,19	-99
2457076,5	0	16	15,16	25,27	12,9	288,88	28,95	26,27	-99
2457076,5	0	4	170,88	26,06	1,9	288,23	105,39	66,61	-99
2457076,5	0	11	189,21	29,07	2,47	286,56	82,41	57,51	-99
2457076,5	0	23	307,5	55,18	8,63	285,71	15,96	24,79	-99
2457076,5	0	27	33,6	60,59	8,77	288,29	21,24	30,16	-99
2457076,5	0	19	170,55	82,57	7	287,42	24,21	35,4	-99
2457076,5	0,008333	31	97,21	18,8	6,4	294,72	70,5	42,47	-99
2457076,5	0,008333	3	226,26	22,05	2,89	282,68	53,35	36,84	-99
2457076,5	0,008333	9	318,37	24,92	11,7	283,42	26,96	25,14	-99
2457076,5	0,008333	16	15,35	25,15	12,92	288,91	29,12	26,32	-99
2457076,5	0,008333	4	170,7	26,19	1,93	288,24	105,09	66,62	-99
2457076,5	0,008333	11	189,11	29,25	2,5	286,57	81,86	57,37	-99
2457076,5	0,008333	23	307,18	55,35	8,61	285,71	15,93	24,79	-99
2457076,5	0,008333	27	33,38	60,36	8,79	288,29	21,27	30,15	-99
2457076,5	0,008333	19	169,98	82,84	7,02	287,42	24,13	35,33	-99
2457076,501	0,016667	31	97,44	18,74	6,37	294,73	73,66	43,82	-99

Figura 5.5: Fichero VTEC, Estación Pamplona (PAMP 054). Época de Observación

t específico. Se señala que este desarrollo es únicamente para el tratamiento y posterior procesamiento de las series de tiempo VTEC.

De manera que la media móvil bajo el criterio expuesto previamente es aplicado al conjunto de periodos participes del análisis ionosférico previo a la ocurrencia de los sismos objeto de estudio, obteniendo los siguientes resultados:



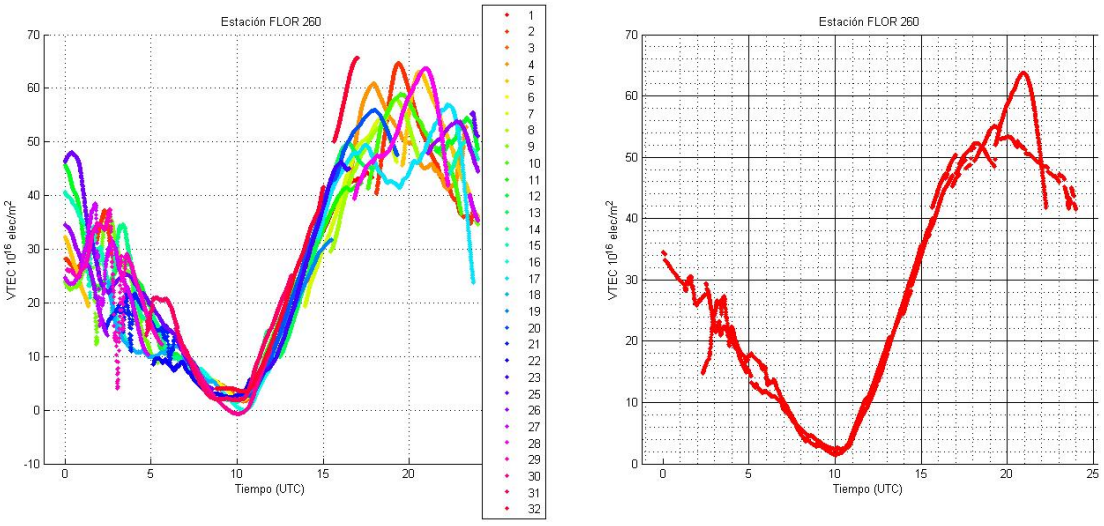
(a) VTEC. Estación BNGA 064

(b) Estación BNGA 064. Aplicación de la media móvil

Figura 5.6: Comparativo VTEC BNGA 064 y Media móvil BNGA 064

En la Figura 5.6(b) se observa el resultado obtenido con la aplicación de la media mó-

vil al conjunto de datos, dado que se registra la agrupación de las líneas de tendencia correspondientes al comportamiento en el tiempo del VTEC, obteniendo así, una única medida asociada a una época de observación y permitiendo de esta forma la construcción de análisis aún más rigurosos sobre el conjunto de datos. En ese sentido se destaca que los resultados encontrados con la aplicación de la media móvil son heterogéneos dado que las observaciones de las que provienen para cualquier periodo no son únicas. No obstante, aún resta resaltar aquellos comportamientos anómalos que probablemente tenga lugar en cortos periodos de tiempo y presenten conexión alguna con sucesos sísmico, todo esto logrado con la implementación de la Transformada de Wavelet al análisis.



(a) VTEC. Estación FLOR 260

(b) Estación FLOR 260. Aplicación de la media móvil

Figura 5.7: Comparativo VTEC FLOR 260 y Media móvil FLOR 260

5.2. Procesamiento de las Series de Tiempo

Incluso después de los procedimientos desarrollados previamente con el objetivo de reducir el ruido en los datos y el posterior agrupamiento de los mismos, aún se observa la conservación en menor proporción de esto fenómeno, con lo cual el análisis desarrollado a posteriori estará sujeto a inconsistencias y probablemente los resultados inmersos en especulaciones; por lo cual, se constituye como indispensable en primer lugar la eliminación de ruido en la serie de tiempo y por supuesto resaltar dentro del comportamiento VTEC a través del tiempo aquellas perturbaciones del estrato atmosférico que representan piedra angular en la búsqueda de las anomalías ionosféricas locales en proximidad a la ocurren-

cia de eventos sísmicos. Es por ello, que de acuerdo a estos requerimientos se aplica al conjunto de datos la transformada de Wavelet.

Sin embargo, en primera instancia debe encontrarse la función Wavelet madre que se ajuste al conjunto en función de su soporte compacto, simetría, momentos de desvanecimiento y regularidad, estos correspondientes a las características generales de las funciones Wavelet madre expuestas en la sección 3.5.2.

La selección de la función Wavelet madre más apropiada se realizó haciendo uso del criterio de la conservación de la energía a través del *Teorema de Parseval* expuesto anteriormente. En ese sentido, a partir de la población del conjunto de datos con estacionalidad diaria se extrajo una muestra aleatoria sin reemplazamiento de acuerdo a la Ecu. 4.3; por consiguiente, los valores en la ecuación serán:

1. N: 111 series de tiempo (Tamaño de la población).
2. n: Número de series extraídas para la muestra.
3. Z: Corresponde al nivel de confianza que se espera obtener con el resultado de la muestra. Para la extracción de este experimento se eligió un valor de confianza del 95 %.
4. p *y* q: Estos valores generalmente provienen de estudios anteriores al experimento a realizar; dado que no se cuenta con esta información se suele utilizar un valor de 0,5
5. e^2: Límite muestral de error; así también como en el item anterior; motivado a su desconocimiento se utilizó un error de 10 %.

$$n = \frac{(1{,}96)^2(0{,}5)^2 111}{111(0{,}1)^2 + (1{,}96)^2(0{,}5)^2} \tag{5.1}$$

De acuerdo a la Ec. 5.1, la muestra extraída tuvo un tamaño de 51 conjunto de datos.

Ahora bien, se experimentó sobre la muestra con las siguientes Wavelet madre: *Daubechies* (1-10), *Coiflets* (1-5) y *Symlets* (2-9); por tal motivo se generaron reportes con la energía de la señal y los respectivas valores de la energía conservada luego de la aplicación de la transformada a partir de las funciones Wavelet mencionadas (Ver Figura 5.8), así también la construcción de gráficas en las cuales se exponen tanto los coeficientes de aproximación como los de detalle (Ver Figura 5.9); encontrándose la función adecuada al conjunto de datos a través de la descripción estadística del experimento realizado y obteniéndose los siguientes resultados:

De la Figura 5.9 se observa que los coeficientes de detalle corresponderán al ruido de la señal entre otros factores de los que se presumen estarían inmersos la radiación solar y

```
###########RESUMEN NUMERICO#################
###########COEFICIENTES TRANSFORMADA WAVELET#####
 Energía de la señal = ; 3.732434e+10
Sumatoría de coeficientes Dau1 = ; 3.732411e+10
Sumatoría de coeficientes Dau2 = ; 3.732411e+10
Sumatoría de coeficientes Dau3 = ; 3.732423e+10
Sumatoría de coeficientes Dau4 = ; 3.732432e+10
Sumatoría de coeficientes Dau5 = ; 3.732401e+10
Sumatoría de coeficientes Dau6 = ; 3.732405e+10
Sumatoría de coeficientes Dau7 = ; 3.732412e+10
Sumatoría de coeficientes Dau8 = ; 3.732430e+10
Sumatoría de coeficientes Dau9 = ; 3.732423e+10
Sumatoría de coeficientes Dau10 = ; 3.732234e+10
Sumatoria de coeficientes Coi1 = ; 3.732433e+10
Sumatoria de coeficientes Coi2 = ; 3.732420e+10
Sumatoria de coeficientes Coi3 = ; 3.732409e+10
Sumatoria de coeficientes Coi4 = ; 3.732400e+10
Sumatoria de coeficientes Coi5 = ; 3.732411e+10
Sumatoria de coeficientes Sym2 = ; 3.732411e+10
Sumatoria de coeficientes Sym3 = ; 3.732423e+10
Sumatoria de coeficientes Sym4 = ; 3.732423e+10
Sumatoria de coeficientes Sym5 = ; 3.732423e+10
Sumatoria de coeficientes Sym6 = ; 3.732423e+10
Sumatoria de coeficientes Sym7 = ; 3.732423e+10
Sumatoria de coeficientes Sym8 = ; 3.732411e+10
Sumatoria de coeficientes Sym9 = ; 3.732411e+10
Energia envolvente Coiflets 1 = 3.732433e+10
Tiempo de ejecución = ; 1.215287e+01  segundos
```

(a) Reporte conservación de la energía POPA 280

```
###########RESUMEN NUMERICO#################
###########COEFICIENTES TRANSFORMADA WAVELET#####
 Energía de la señal = ; 2.894363e+10
Sumatoría de coeficientes Dau1 = ; 2.894343e+10
Sumatoría de coeficientes Dau2 = ; 2.894362e+10
Sumatoría de coeficientes Dau3 = ; 2.894344e+10
Sumatoría de coeficientes Dau4 = ; 2.894333e+10
Sumatoría de coeficientes Dau5 = ; 2.894323e+10
Sumatoría de coeficientes Dau6 = ; 2.894313e+10
Sumatoría de coeficientes Dau7 = ; 2.894313e+10
Sumatoría de coeficientes Dau8 = ; 2.894314e+10
Sumatoría de coeficientes Dau9 = ; 2.894324e+10
Sumatoría de coeficientes Dau10 = ; 2.894164e+10
Sumatoria de coeficientes Coi1 = ; 2.894312e+10
Sumatoria de coeficientes Coi2 = ; 2.894323e+10
Sumatoria de coeficientes Coi3 = ; 2.894323e+10
Sumatoria de coeficientes Coi4 = ; 2.894323e+10
Sumatoria de coeficientes Coi5 = ; 2.894353e+10
Sumatoria de coeficientes Sym2 = ; 2.894355e+10
Sumatoria de coeficientes Sym3 = ; 2.894344e+10
Sumatoria de coeficientes Sym4 = ; 2.894343e+10
Sumatoria de coeficientes Sym5 = ; 2.894334e+10
Sumatoria de coeficientes Sym6 = ; 2.894333e+10
Sumatoria de coeficientes Sym7 = ; 2.894334e+10
Sumatoria de coeficientes Sym8 = ; 2.894333e+10
Sumatoria de coeficientes Sym9 = ; 2.894333e+10
Energia envolvente Daubechies 2 = 2.894361e+10
Tiempo de ejecución = ; 1.820888e+01  segundos
```

(b) Reporte conservación de la energía FLOR 273

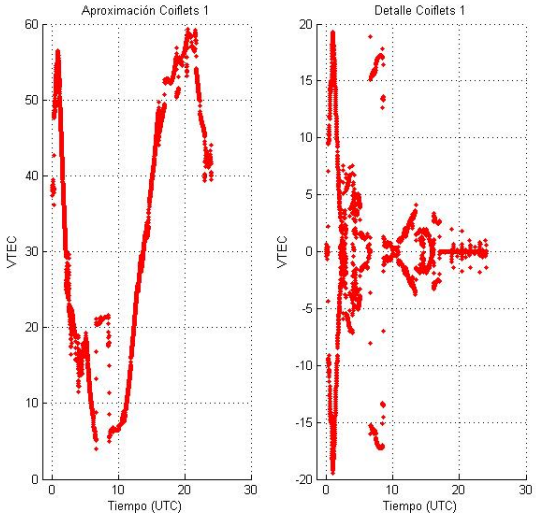
```
###########RESUMEN NUMERICO#################
###########COEFICIENTES TRANSFORMADA WAVELET###
 Energía de la señal = ; 4.367154e+10
Sumatoría de coeficientes Dau1 = ; 4.367150e+10
Sumatoría de coeficientes Dau2 = ; 4.367153e+10
Sumatoría de coeficientes Dau3 = ; 4.367153e+10
Sumatoría de coeficientes Dau4 = ; 4.367121e+10
Sumatoría de coeficientes Dau5 = ; 4.367120e+10
Sumatoría de coeficientes Dau6 = ; 4.367119e+10
Sumatoría de coeficientes Dau7 = ; 4.367118e+10
Sumatoría de coeficientes Dau8 = ; 4.367117e+10
Sumatoría de coeficientes Dau9 = ; 4.367118e+10
Sumatoría de coeficientes Dau10 = ; 4.367104e+1
Sumatoria de coeficientes Coi1 = ; 4.367152e+10
Sumatoria de coeficientes Coi2 = ; 4.367145e+10
Sumatoria de coeficientes Coi3 = ; 4.367143e+10
Sumatoria de coeficientes Coi4 = ; 4.367145e+10
Sumatoria de coeficientes Coi5 = ; 4.367144e+10
Sumatoria de coeficientes Sym2 = ; 4.367144e+10
Sumatoria de coeficientes Sym3 = ; 4.367145e+10
Sumatoria de coeficientes Sym4 = ; 4.367145e+10
Sumatoria de coeficientes Sym5 = ; 4.367147e+10
Sumatoria de coeficientes Sym6 = ; 4.367140e+10
Sumatoria de coeficientes Sym7 = ; 4.367141e+10
Sumatoria de coeficientes Sym8 = ; 4.367117e+10
Sumatoria de coeficientes Sym9 = ; 4.367122e+10
Energia envolvente Coiflets 1 = 4.367152e+10
Tiempo de ejecución = ; 1.148062e+01  segundos
```

(c) Resumen conservación de la energía PAMP 084

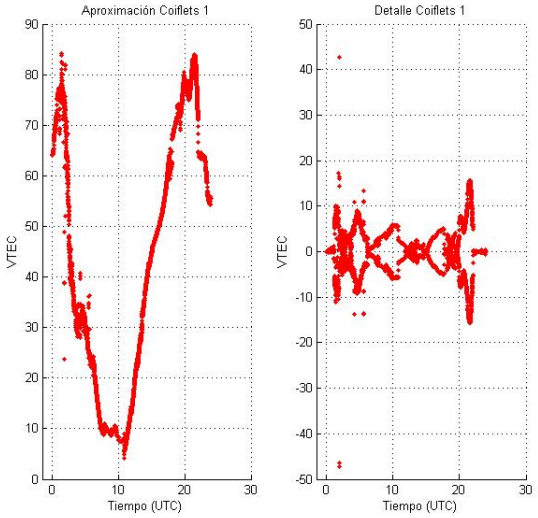
```
###########RESUMEN NUMERICO#################
###########COEFICIENTES TRANSFORMADA WAVELET####
 Energía de la señal = ; 2.068705e+10
Sumatoría de coeficientes Dau1 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau2 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau3 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau4 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau5 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau6 = ; 2.068701e+10
Sumatoría de coeficientes Dau7 = ; 2.068693e+10
Sumatoría de coeficientes Dau8 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau9 = ; 2.068700e+10
Sumatoría de coeficientes Dau10 = ; 2.068700e+10
Sumatoria de coeficientes Coi1 = ; 2.0687003e+10
Sumatoria de coeficientes Coi2 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Coi3 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Coi4 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Coi5 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym2 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym3 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym4 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym5 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym6 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym7 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym8 = ; 2.06870e+10
Sumatoria de coeficientes Sym9 = ; 2.06870e+10
Energia envolvente Coiflets 1 = 2.068703e+10
Tiempo de ejecución = ; 9.777808e+00  segundos
```

(d) Reporte conservación de la energía BEJA 075

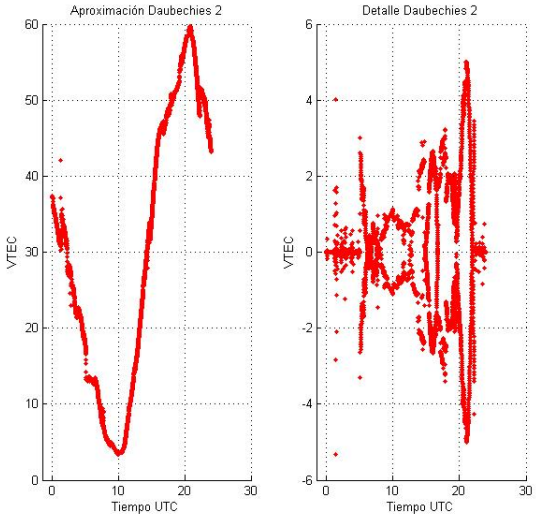
Figura 5.8: Comparativo energía de la señal frente a energía conservada



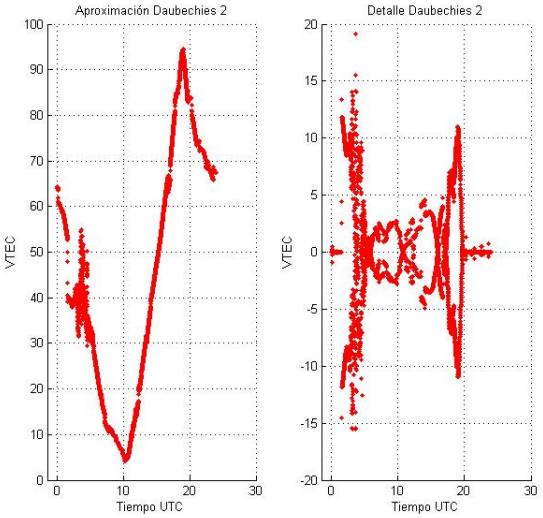
(a) PAMP 054. Wavelet madre Coiflets 1



(b) BNGA 060. Wavelet madre Coiflets 1



(c) PSTO 260. Wavelet madre Daubechies 2



(d) POPA 270. Wavelet madre Daubechies 2

Figura 5.9: Análisis correspondiente a la selección de la función Wavelet madre

	WAVELET	n_i	f_i
1	Daubechies 1	0	0
2	Daubechies 2	12	0,235
3	Daubechies 3	3	0,058
4	Daubechies 4	0	0
5	Daubechies 5	0	0
6	Daubechies 6	1	0,019
7	Daubechies 7	0	0
8	Daubechies 8	0	0
9	Daubechies 9	0	0
10	Daubechies 10	2	0,039
11	Coiflets 1	25	0,49
12	Coiflets 2	3	$0,058$
13	Coiflets 3	0	0
14	Coiflets 4	0	0
15	Coiflets 5	4	0,078
16	Symlets 2	0	0
17	Symlets 3	0	0
18	Symlets 4	0	0
19	Symlets 5	0	0
20	Symlets 6	0	0
21	Symlets 7	0	0
22	Symlets 8	0	0
23	Symlets 9	0	0
	TOTAL	51	1

Cuadro 5.1: Resumen del experimento para la selección de la función Wavelet madre.

comportamiento atmosféricos principalmente, sin embargo el análisis de estos es excluido por su distanciamiento con los objetivos de esta investigación; en ese sentido, cabe resaltar que estos presentan un comportamiento espejo sobre el eje de las abscisas que es registrado en diferentes magnitudes.

De otro parte, a partir de una medida empírica probabílistica calculada por la frecuencia relativa presentada en la Tabla 5.1, se encontró que en un 49 % la función Wavelet madre *Coiflets 1* se ajustó de mejor manera al conjunto de datos bajo el criterio de la conservación de la energía, así mismo, la función *Daubechies 2* presentó una aproximación a la energía de las series en los mismos términos expuestos, en una proporción del 23,5 %. Otras funciones Wavelet tuvieron valores cercanos a la energía de la señal pero en proporciones muy pequeñas.

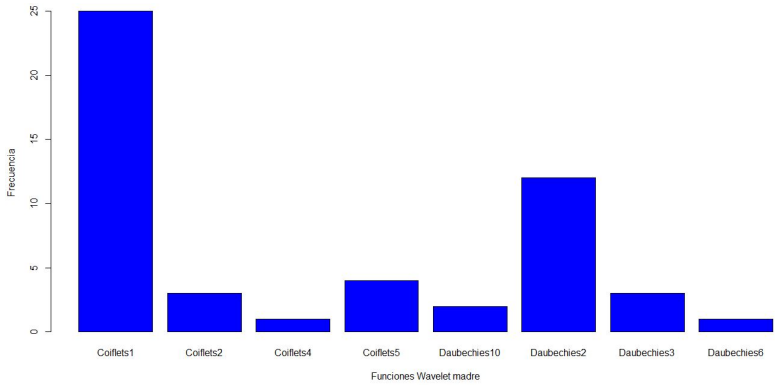


Figura 5.10: Diagrama de barras. Selección de la función Wavelet madre.

Por lo anterior, es elegida la función Wavelet madre de acuerdo a la medida probabilística empírica más cercana a 1 encontrada en el experimento y cuyo resultado se extrapoló a la población de datos objeto de estudio con los fines expuestos previamente y sobre los cuales se realizaron los análisis a presentar.

5.3. La Vega, Cauca

Para este estudio de caso fueron procesadas las estaciones de POPA y PSTO en el periodo comprendido entre el día 259 (Septiembre 15 de 2012) y el día 288 (Octubre 14 de 2015), teniendo en cuenta la ocurrencia del sismo que tuvo lugar el día 274 (Septiembre 30 de 2012) hacía las 16^h30^m. Respecto al procesamiento, fue desarrollado a partir de los resultados expuestos en la sección anterior, permitiendo de esta forma encontrar medidas

estadísticas principalmente que permitan develar las características ionosféricas previas a la ocurrencia del terremoto registrado.

5.3.1. Estación PSTO

La estación PSTO en la capital del departamento de Nariño se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas geográficas: $1°12'42''$ latitud norte, $77°16'37'$ longitud oeste y a 114,57 km del epicentro del evento. Se contó con los registros 15 días previo a la ocurrencia del evento y 15 días posterior a este.

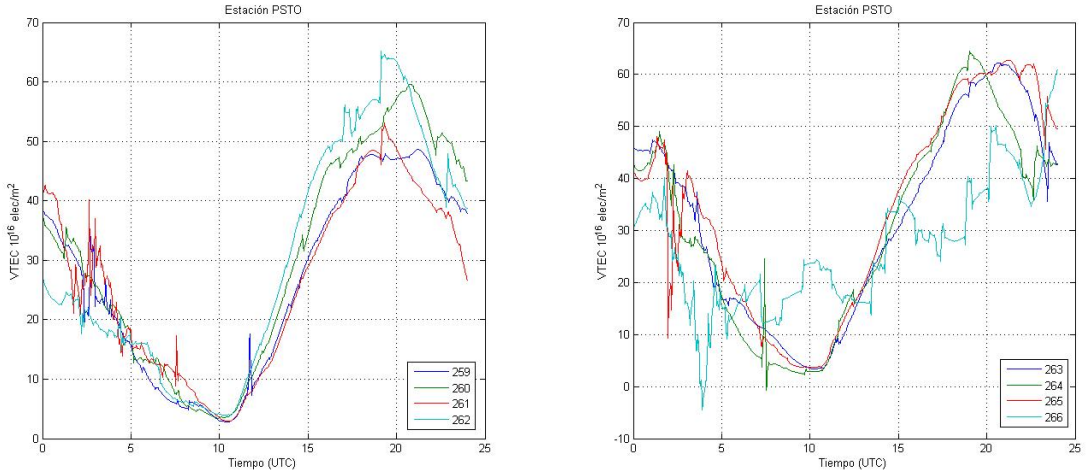
En los primeros 4 días analizados, es decir, los días 259, 260, 261 y 262 se encontró un comportamiento de VTEC reiterativo en cada uno de estos periodos, se registraron coeficientes de variación entre las 0^h y 5^h mayores en promedio a 10 % e inferiores a 22,36 %, entre las 10^h y 14^h el comportamiento es muy similar para todos los días, por último a partir de las 15^h y hasta las 22^h la diferencia porcentual calculada en este intervalo no superó el 11,98 % siendo este un máximo y de 0,035 % un mínimo. Se destaca el día 262 cuyo registro a las 19^h alcanzó 65.76 unidades, siendo superlativo a lo encontrado en días anteriores.

DÍA/HORA	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h
259	11,34 %	12,27 %	16,57 %	16,78 %	14,22 %	20,93 %
260	15,02 %	6,39 %	18,66 %	16,23 %	17,24 %	12,36 %
261	16,46 %	11,10 %	10,24 %	10,01 %	22,36 %	14,44 %
262	14,38 %	11,77 %	10,85 %	16,87 %	6,668 %	18,85 %

Cuadro 5.2: Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 259, 260, 261 y 262

Posteriormente, para los días 263, 264 y 265 se registraron comportamiento similares a los descritos previamente, es decir, la tendencia indica que hacía las 0^h describe un máximo relativo que oscila entre 40 y 50 unidades VTEC, en inmediaciones de las 10^h el VTEC es mínimo y varía de 2 a 4 unidades y por último para el periodo comprendido entre las 15 y 23^h59^m es donde se presentan las mayores variaciones de esta variable respecto al día inmediatamente anterior, para los días presentados fueron registradas diferencias porcentuales entre el 13,5 % hacías las 16^h y una máxima diferencia entre las 20^h y 21^h de 22,11 %.

Sin embargo, la aparente normalidad del comportamiento VTEC analizado previamente desaparece y en el día 266 la fluctuación en el tiempo no se asemeja a ninguna de las presentadas, en ese sentido, no describe los valores máximos ni mínimos de otros días y en los intervalos mencionados. Cabe resaltar que cerca de las 10^h el nivel de VTEC alcanza



(a) Comportamiento VTEC, Estación PSTO 259, 260, 261 y 262

(b) Comportamiento VTEC, Estación PSTO 263, 264, 265 y 266

Figura 5.11: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO

24,8 unidades a diferencia de otros días. Así también los coeficientes de variación para ese día no fueron inferiores al 25 % hasta alcanzar un máximo de 38,59 %. Por lo tanto, y de acuerdo a diversos estudios de caso desarrollados a lo largo del planeta, indican que las perturbaciones ionosféricas pueden tener lugar en un periodo de hasta 11 días previo a la ocurrencia del evento, de allí que exista una correlación entre la suceso sísmico y la aparición de las anomalías principalmente de la que no es posible precisar su magnitud, siendo para el presente caso una diferencia de aproximadamente 7 días entre la anomalía ionosférica y el desarrollo del terremoto. Para las 23^h se registró un salto de ciclo que es representado por la sigla SC en la Tabla 5.4.

DÍA/HORA	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h	6^h	7^h	8^h	9^h	10^h	11^h
266	29,21 %	25,48 %	29,15 %	36,27 %	38,45 %	29,06 %	28,52 %	30,66 %	32,96 %	29,21 %	25,01 %	27,83 %

Cuadro 5.3: Coeficiente de variación Estación PSTO 266 en el intervalo $[0^h, 11^h]$

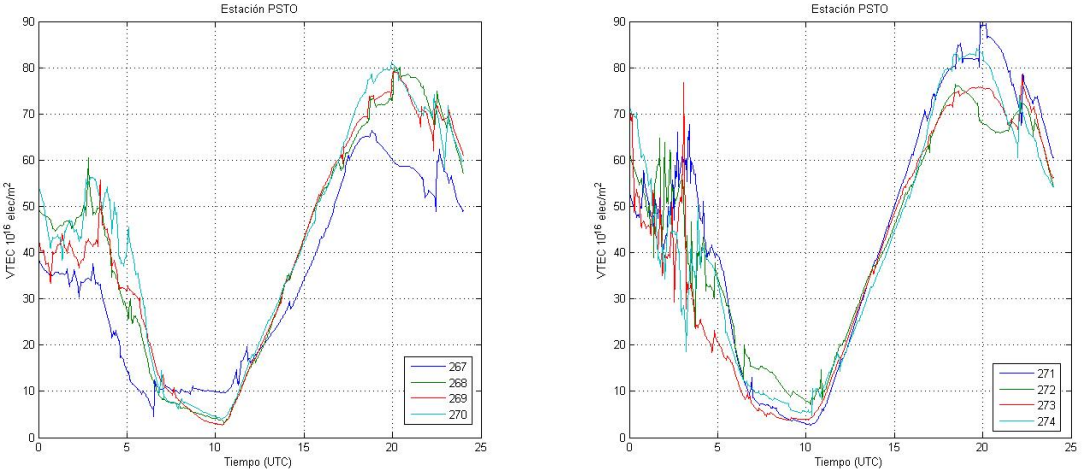
DÍA/HORA	12^h	13^h	14^h	15^h	16^h	17^h	18^h	19^h	20^h	21^h	22^h	23^h
266	31,10 %	28,65 %	29,49 %	34,62 %	33,67 %	32,91 %	30,66 %	29,39 %	25,35 %	25,32 %	27,37 %	SC

Cuadro 5.4: Coeficiente de variación Estación PSTO 266 en el intervalo $[12^h, 23^h]$

A partir del día 267 es recuperado la tendencia VTEC asemejándose a la evidenciada en días anteriores; sin embargo y particularmente en el intervalo comprendido entre las 3^h y 11^h muestra un alto coeficiente de variación tal como se registra en la Tabla 5.5 en donde hacía las 5^h alcanzó a ser de 54,19 %; en cuanto a los días 268, 269 y 270, aunque se conserva la tendencia del comportamiento descrito previamente, la curva VTEC tiene un desplazamiento positivo en el sentido del eje Y con un aumento de en promedio 20 unidades para el intervalo $[0^h, 5^h]$ y $[17^h, 23^h]$.

DÍA/HORA	3^h	4^h	5^h	6^h	7^h	8^h	9^h	10^h	11^h
267	26,58 %	34,01 %	54,19 %	37,75 %	25,31 %	27,66 %	29,42 %	28,94 %	18,25 %

Cuadro 5.5: Coeficiente de variación Estación PSTO 267 en el intervalo $[3^h, 11^h]$



(a) Comportamiento VTEC, Estación PSTO 267, 268, 269 y 270

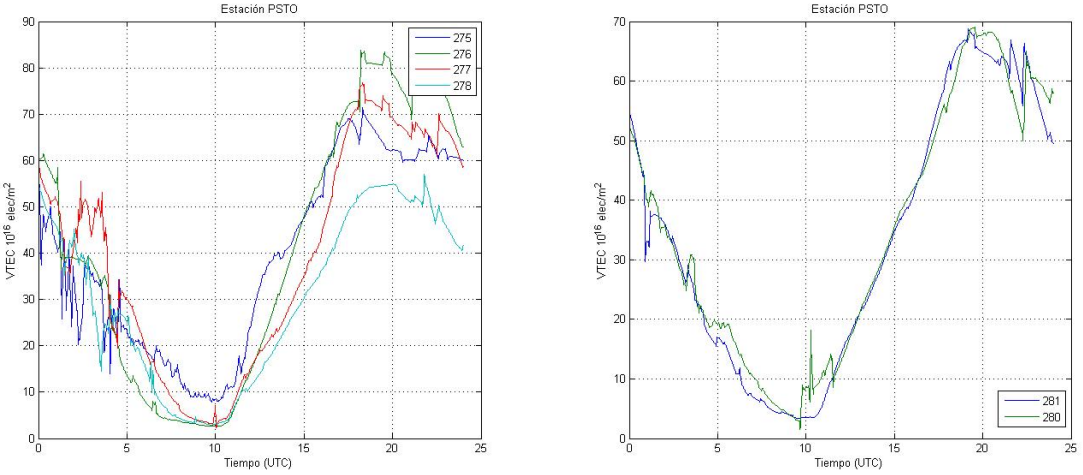
(b) Comportamiento VTEC, Estación PSTO 271, 272, 273 y 274

Figura 5.12: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO

De otra parte, se observa en la Figura 5.12(b) que para los días 271 a 274 se presenta un aumento promedio de alrededor de 20 unidades VTEC en el intervalo $[16^h, 23^h]$ respecto a las registradas entre los días 259 y 266 donde tan solo fueron en promedio de 60 unidades, siendo un cambio porcentual de 33 %. De otro lado, se observó una alta variación entre las 0^h y 5^h para el día 271, registros que son asociables a la ocurrencia del terremoto ocurrido el día 274.

DÍA/HORA	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h
271	37,09 %	46,78 %	46,02 %	35,47 %	25,32 %	24,99 %
272	13,36 %	19,64 %	24,65 %	14,20 %	24,14 %	30,02 %
273	11,79 %	11,02 %	12,28 %	17,78 %	31,42 %	13,31 %
274	22,54 %	14,53 %	16,96 %	14,15 %	11,79 %	18,75 %
275	16,27 %	11,70 %	18,34 %	18,47 %	19,80 %	19,73 %

Cuadro 5.6: Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 271, 272, 273, 274 y 275



(a) Comportamiento VTEC posterior al evento sísmico

(b) Comportamiento VTEC para los días 280, 281 y 282

Figura 5.13: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación PSTO

La variabilidad de VTEC persistió en el tiempo a pesar de la ocurrencia del evento, así mismo los coeficientes de variación registrados se encuentran por encima del 16 % y tienden a disminuir posterior a las 11^h. Aunque no existe una clara reducción de los niveles máximos de VTEC en todas las horas del día si se observa una disminución en la variabilidad en cuento a su avance en el tiempo como se observa en la Figura 5.13(a). Sin embargo, no es sino a partir del día 280 donde se identifica una clara disminución de los coeficientes de variación y por ende en los niveles de VTEC en el intervalo $[0^h, 24^h]$. Este comportamiento de normalización respecto a la variabilidad osciló entre el 3 % y 11 %, persistió en el tiempo hasta alcanzar lo registrado en la Figura 5.13(b) y en ese sentido los niveles de VTEC se redujeron en un 28 %.

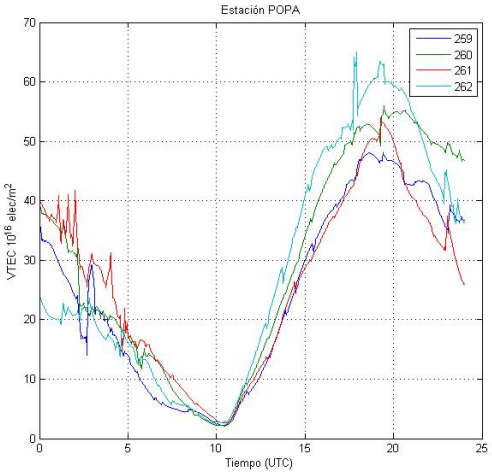
5.3.2. Estación POPA

La estación POPA ubicada en la ciudad de Popayán, departamento del Cauca, cuyas coordenadas geográficas son: $2°26'35''$ latitud norte, $76°36'4''$ longitud oeste y a una distancia de 147,42 km del epicentro del terremoto. Al igual que para la estación anterior se contó con la totalidad de los registros en el periodo establecido.

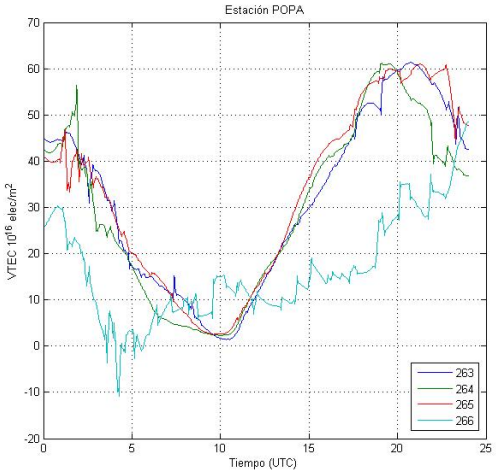
El comportamiento registrado en los días 259 y 260 presenta similitud con la descrita para los mismos periodos en la estación PSTO en cuanto a la variabilidad asociada a cada hora cuya oscilación fue entre 0,1 % y 18 %. Para los días 261 y 262, la tendencia de la curva a partir de las 13^h crece más rápidamente para este último y en ese sentido alcanza un máximo de 63,39 unidades de VTEC en las 19^h frente a 53,5 unidades registradas para los días inmediatamente anteriores.

Las características principales de la tendencia registrada anteriormente es reiterativa para los días 263, 264 y 265, donde las diferencias entre las unidades VTEC para cada día no superan el 13 %. Por otra parte, entre la 1^h y 2^h del día 264 muestra una pequeña perturbación donde se alcanzan 56,8 unidades VTEC en oposición a las 45,5 unidades en promedio que se presentaron en días anteriores y posteriores, sin embargo aunque la diferencia porcentual es de cerca del 19,89 % la variabilidad de este hecho no es mayor a 10 %, por lo que su asociación a precursores sísmicos es inverosímil. Es reiterativo este comportamiento VTEC hasta este periodo ya que posterior las curvas sufren una alta variabilidad y un aumento de las unidades registradas; particularmente, el día 266 presenta un comportamiento cuya variabilidad relacionada en la Tabla 5.7 y 5.8 se encontró en sentido similar al registrado en este mismo periodo en la estación PSTO, donde la curva en ningún tiempo t del periodo se ajustó o presentó similitud alguna con las tendencias registradas anterior ni posteriormente.

Ahora bien, para los días 267 y 268 la variabilidad del comportamiento VTEC oscila entre el 12 % y 30 %, encontrándose un máximo de esta en el día 268 hacía las 3^h, de



(a) Comportamiento VTEC, Estación POPA 259, 260, 261 y 262



(b) Comportamiento VTEC, Estación POPA 263, 264, 265 y 266

Figura 5.14: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA

DÍA/HORA	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h	6^h	7^h	8^h	9^h	10^h	11^h
266	44,65 %	44,45 %	39,41 %	36,49 %	44,72 %	34,95 %	30 %	34,67 %	41,91 %	31,63 %	37,43 %	39,37 %

Cuadro 5.7: Coeficiente de variación Estación POPA 266 en el intervalo $[0^h, 11^h]$

DÍA/HORA	12^h	13^h	14^h	15^h	16^h	17^h	18^h	19^h	20^h	21^h	22^h	23^h
266	43,95 %	36,50 %	37,64 %	40,70 %	42,06 %	44,41 %	37,67 %	31,23 %	20,80 %	22,04 %	21,14 %	*SC*

Cuadro 5.8: Coeficiente de variación Estación POPA 266 en el intervalo $[12^h, 23^h]$

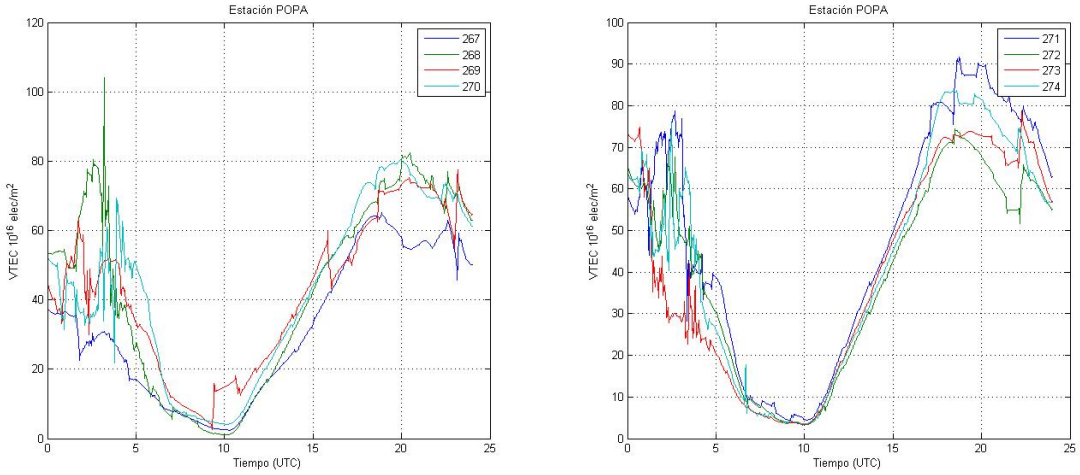
esto hecho cabe resaltar que se registra a manera de comportamiento singular asociado un incremento de 104 unidades VTEC en el día 268 frente a 30,68 presentadas en el día anterior, representando así un incremento de 70,5 %.

En cuanto al intervalo comprendido entre las 13^h y 23^h se encontró de la misma forma cambios a partir del día 267. En ese sentido, cabe señalar que las unidades en promedio de VTEC oscilan entre 55 y 60 en el intervalo $[19^h, 21^h]$ en días precedentes; sin embargo, para este mismo periodo pero en los días 268, 269 y 270, el nivel promedio sufrió un incremento de alrededor de 20 unidades, a pesar de ello se mantienen diferencias porcentuales entre el 10 % y 15 % entre los días mencionados y su respectivo inmediatamente anterior, pero del 25 % con los periodos 259, 260, 261 y 262 . No obstante, y a diferencia de lo expuesto,

DÍA/HORA	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h
267	15,77 %	15,08 %	12,21 %	12,46 %	19,33 %	16,55 %
268	16,37 %	18,02 %	14,58 %	13,75 %	19,53 %	28,58 %
269	27,45 %	19,30 %	18,47 %	15,86 %	14,94 %	14,30 %
270	13,19 %	18,26 %	19,39 %	20,49 %	14,19 %	15,66 %

Cuadro 5.9: Coeficiente de variación en el intervalo $[0^h, 5^h]$ para los días 267, 268, 269 y 270

particularmente para el día 268 y 267 las diferencias porcentuales tienden aumentar hasta registrarse un cambio del 30,89 % hacía las 20^h.



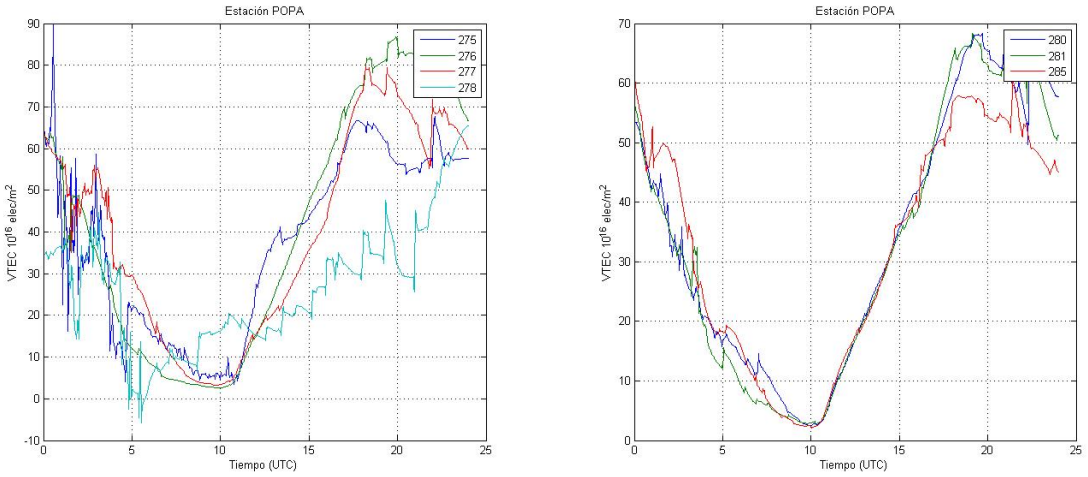
(a) Comportamiento VTEC, Estación POPA 267, 268, 269 y 270

(b) Comportamiento VTEC, Estación POPA 271, 272, 273 y 274

Figura 5.15: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA

Se observa la reiteración de los comportamiento descritos a lo largo de los periodos presísmicos analizados. Respecto a la Figura 5.15(b), se encontró el mantenimiento de la variabilidad de los datos tal como ocurrió en días anteriores en donde dicho coeficiente osciló entre el 12 % y 32 %. Por otra parte, las curvas VTEC en el intervalo comprendido entre las $[15^h, 22^h]$ horas tienen un comportamiento descendente en función del transcurso de los periodos evaluados; es decir, el día 271 presentó el mayor nivel de VTEC alcanzando 91.06 unidades frente a 80.66 que se registraron para el día 272 a las $18{,}7^h$, obteniéndose así una diferencia de 11,42 %; de otra parte, se encontró que este aumento significa una diferencia porcentual de 32 % frente al comportamiento promedio presentado en an-

teriores periodos. Ahora bien, respecto al día previo al evento sísmico el VTEC continua en descenso y es inferior al expuesto donde tan solo alcanza un máximo 72.82 unidades; sentido en el cual los decrementos persisten aún en el día del evento donde tienen lugar 71,9 unidades y cuya diferencia porcentual solo es de 1,26 %. Cabe resaltar que justo a la hora del evento no se registran cambios significativos en el comportamiento del Contenido Total de Electrones.



(a) Comportamiento VTEC, Estación POPA 271, 272, 273 y 274

(b) Comportamiento VTEC, Estación POPA 280 y 281

Figura 5.16: Comparativo de estacionalidad diaria VTEC para la Estación POPA

Como se observó en la estación PSTO y de forma semejante, a pesar de la ocurrencia del evento sísmico los niveles de VTEC no disminuyeron, es así como se identifican 90,04 unidades a las $0{,}55^h$ siendo este suceso particular frente a los días posteriores en el mismo periodo, cabe resaltar que en las horas ulteriores el VTEC solo registró 66.73 unidades a las $17{,}83^h$ y así también entre las 19^h y 20^h se alcanzó un máximo de 86.6 unidades para el día 276. En este punto, se destaca el comportamiento presentado en el periodo 278 que por su alta variabilidad es similar al registrado en el día 266. Posteriormente estas curvas disminuyen substancialmente variabilidad; más aún se esperaba que las tendencias de las curvas analizadas se ajustaran a las registradas en periodos de inexistente actividad sísmica, hecho que no sucede. Siendo que solo hasta el día 280 empieza la desaparición de la alta variabilidad de los datos en el tiempo y junto a esto la disminución de los niveles de VTEC, de los cuales se encontró un decremento en promedio de 22,22 %. En ese sentido, a pesar de que persista una inusual conducta ionosférica no son registrados replicas ni eventos sísmicos de otra magnitud en la región de estudio.

5.3.3. Análisis Espacial I

De acuerdo a los resultados expuestos anteriormente, se ha evidenciado que estos resultan ser parcialmente homogéneos para las estaciones estudiadas; así también, se encontró que los mayores indicios correspondientes a la presencia de anomalías ionosféricas fueron registrados en intervalos de tiempo de mayor exposición a la radiación solar, además de ocurrir el terremoto sobre las 16^h30^m del día 274 de 2012. De otra parte, fueron segmentadas las series de tiempo en periodos de 1^h y unificados los registros para la posterior construcción de mapas ionosféricos sobre la región objeto de estudio.

En primer lugar, 15 días previos a la ocurrencia del movimiento telúrico, los niveles de VTEC registrados tan solo alcanzaron en promedio 50 unidades entre las 19^h y 20^h, siendo este periodo el de mayor exposición solar y por ende donde se esperan altas cantidades VTEC. En tal sentido, para el día 259 se observa una tendencia de crecimiento desde el oriente y hacía el occidente; sin embargo esta tendencia desaparece para el día 260 y tan sólo se registran 48 unidades aproximadamente en el ambiente ionizado con una variación espacial prácticamente nula.

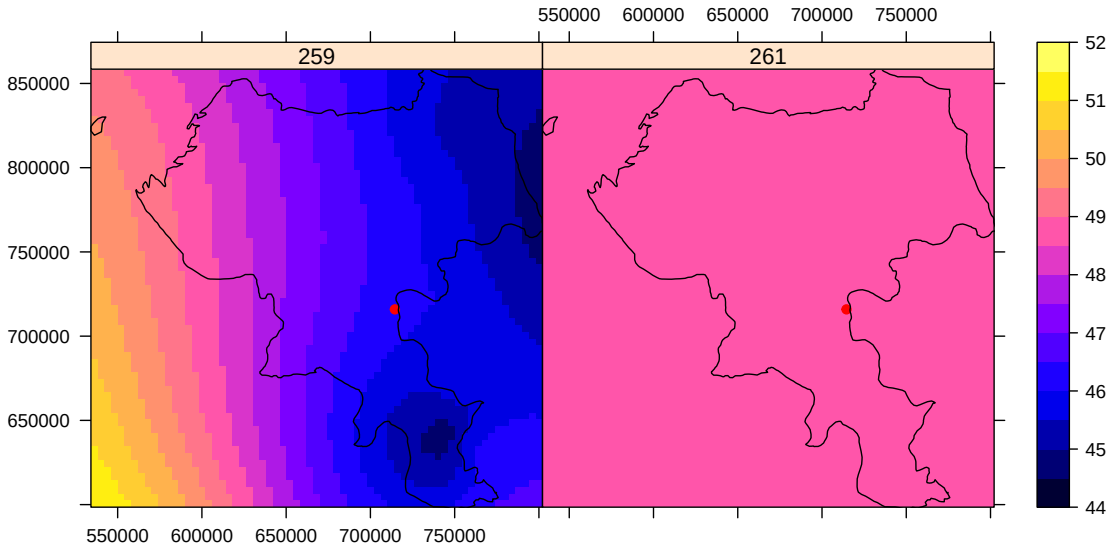


Figura 5.17: Comportamiento ionosférico día 259 19^h - 20^h

Particularmente, en la siguiente hora las configuraciones espaciales se invierten, es decir que para el día 259 los niveles de VTEC se ubicaron entre 48 y 50 unidades y su variación espacial desapareció; más aún para el periodo posterior aparece una tendencia desde el

norte oriente con los registro más bajos y en sentido sur occidente, sin embargo la variabilidad no supera el 12 %.

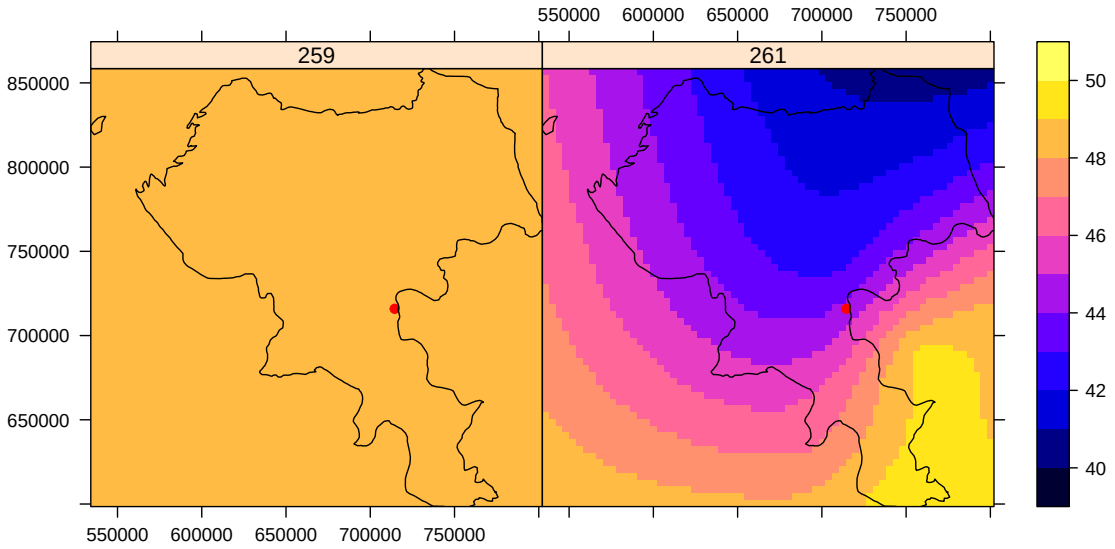


Figura 5.18: Comportamiento ionosférico día 259 20^h - 21^h

Los cambios ionosféricos significativos comienzan a registrarse el día 266 cuya alta variabilidad fue registrada en la sección anterior, respecto a su representación como fenómeno espacial se observa un aumento en forma de espiral que se origina desde el sur oriente de la zona de estudio y se expande hacía el occidente, y presentando un crecimiento gradual que alcanza a ser cercano al 50 %, de este hecho se destaca que sobre el epicentro del evento (Representado en el mapa por un punto rojo) son registrados las mayores mediciones VTEC. De otra parte en la región norte oriental los niveles de VTEC llegan a ser tan sólo de 30 unidades, aún más inferiores a los registrados en días anteriores bajo la aparente normalidad vista.

Luego de esta inusual variabilidad, los incrementos VTEC son de 25 % siendo este un mínimo y que cubren en general la zona de estudio, no obstante el área norte y oriental lo incrementos son de 32,5 %, lo anterior ocurrido entre las 19^h y 20^h; posteriormente la variación espacial es de 36 %, donde se destaca el fenómeno de mayor ionización hacía la zona sur occidental, dirección en la cual tiende a crecer esta variable ionosférica. Aparentemente la inozación también aumenta en dirección sur oriente dejando los niveles de VTEC menores sobre el norte y centro de la región.

Ahora bien, el día 271 entre las 20^h y 21^h es registrado con la mayor ionización siendo esta parcialmente homogénea, de hecho la variabilidad sobre la región no supera el 10 %,

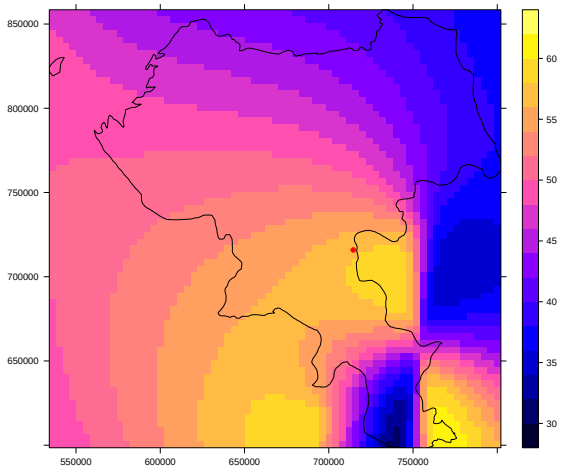


Figura 5.19: Fenómeno VTEC día 266 19^h y 20^h

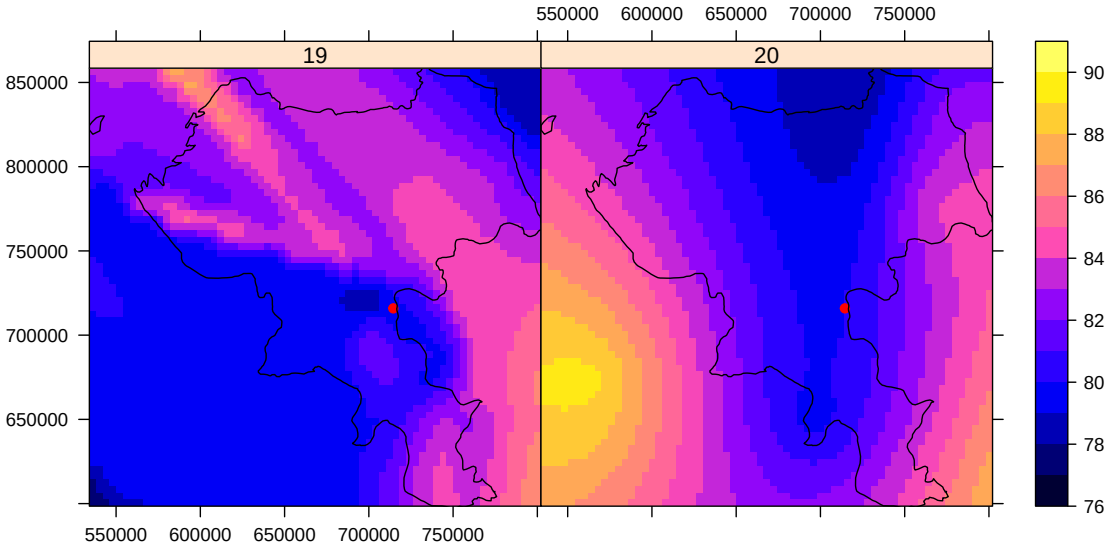


Figura 5.20: Fenómeno VTEC día 268 19^h y 20^h

no obstante lo mayores registros no se encuentran sobre el epicentro del evento y tampoco presenta una tendencia de crecimiento o decremento VTEC. Los días posteriores y especialmente el día previo y del evento se observan en descenso y se reconoce de nuevo la tendencia de decremento registrada previamente. Fundamentalmente, anomalías ionosféricas no son registradas en este periodo, como tampoco se observan fenómenos singulares el día del evento ni en la ocurrencia del mismo, mas sin embargo, estarán asociados a dichas particularidades los comportamientos registrados el día 266 y 271 descritos previamente.

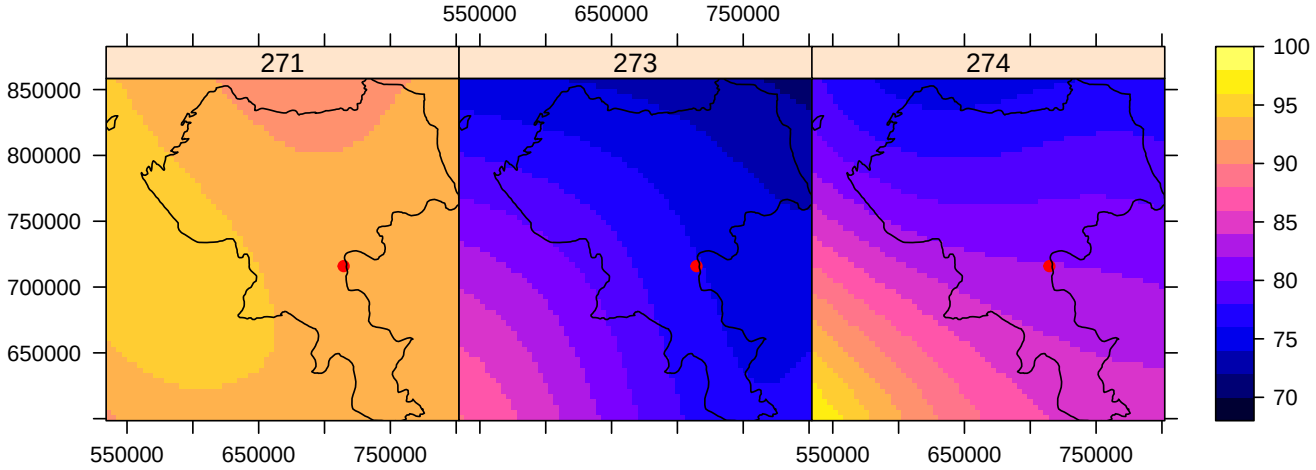


Figura 5.21: Comportamiento VTEC 271, 273 y 274 [20^h y 21^h]

Los niveles VTEC se estabilizan sólo hasta el día 287 sobre los registros vistos por ejemplo para el periodo 259, 13 días luego de la ocurrencia del evento sísmico. En ese mismo sentido, disminuye la variación espacial de los datos siendo cercana al 10,1 %, además se configura de nuevo en sentido sur norte la tendencia sobre la cual tienden a aumentar el nivel VTEC.

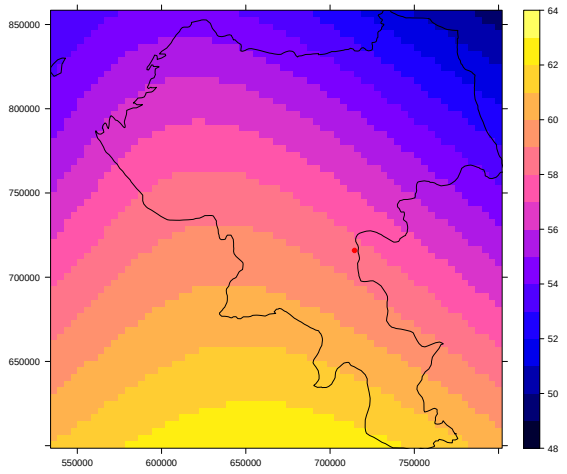


Figura 5.22: Comportamiento VTEC, día 287 [19^h y 20^h]

5.4. Los Santos, Santander

En función de los resultados expuestos en secciones precedentes, fueron procesados el conjunto de datos VTEC correspondientes a las estaciones MAGNA y asociadas al sismo en el municipio de Los Santos, Santander, de allí, se realizó un análisis a partir de medidas estadísticas en estacionalidad horaria de los días evaluados y los respectivos análisis comparativos entre los días objeto de estudio, permitiendo así la identificación de anomalías ionosféricas locales. Cabe resaltar que la ocurrencia del evento corresponde al día 069 (Marzo 10 de 2015). Por lo pronto, a continuación se desarrolla el análisis para cada una de las estaciones estudiadas.

5.4.1. Estación BEJA

La estación BEJA ubicada en el municipio de Barrancabermeja, Santander y cuyas coordenadas geográficas son: $7°3'38''$ latitud norte y $73°52'32''$ longitud oeste, a una distancia del epicentro de 102,40 km. En contraposición a los periodos establecidos y dado que las estaciones MAGNA presentan intermitencia que varía de periodos cortos tales como minutos u horas hasta grandes lapsos que pueden llegar a ser hasta de días; por lo cual, y previendo que dentro del periodo evaluado se encontrara el sismo y por supuesto días anteriores al mismo se evaluaron de esta estación desde el día 063 (Marzo 4 de 2015) hasta el día 080 (Marzo 21 de 2015).

Bajo el supuesto que la ionosfera y más exactamente el Contenido Total de Electrones presenta un comportamiento de acuerdo a la actividad solar, es de esperarse que este siga una tendencia que sea reiterativa en el tiempo, por ello se enuncia como comportamiento anómalo en cuanto dicho supuesto no se cumple y que para el presente caso de estudio aparecen para el día 068 entre las 19^h y 21^h aproximadamente, encontrándose que estas tuvieron un máximo cerca de las 20^h (Ver Figura 5.4.1), comportamiento que no fue encontrado en la evaluación de periodos anteriores.

Se corrobora este comportamiento en el comparativo de estacionalidad diaria, siendo el día previo al evento aquel que presenta mayores valores de esta medida ionosférica. Sentido en el cual cabe señalar cambios significativos registrados entre el día 067 y 068. En primer lugar, en el intervalo comprendido entre las $[2^h, 5^h]$ el coeficiente de variación fue en promedio de 23,45 % para el día 068 mientras que en ese mismo intervalo para el día 067 fue de 12,01 %. Por su parte, a partir de las 16^h del día previo al evento, la pendiente de la curva cambia dramáticamente frente a la presentada en el día anterior y el nivel de VTEC alcanza 110,89 unidades cerca de las 20^h frente a las 59,01 unidades que fueron registradas en el periodo anterior, teniendo así un incremento de cerca del 46,7 %.

Respecto a la Figura 5.24(b), se encontró un comportamiento similar al descrito pre-

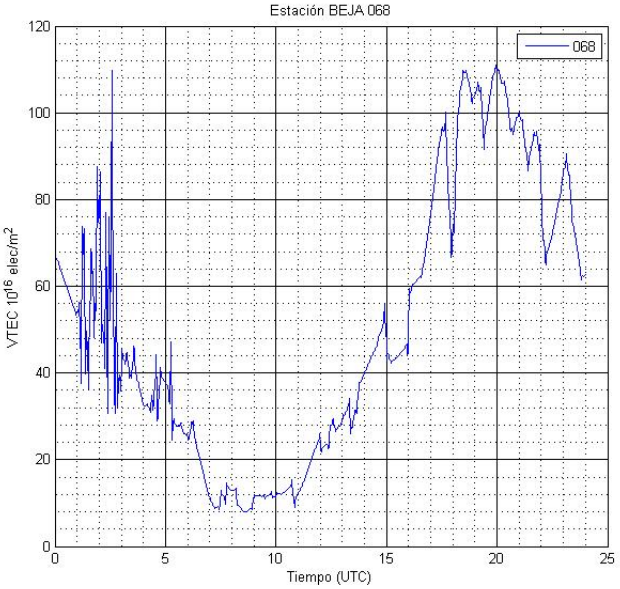
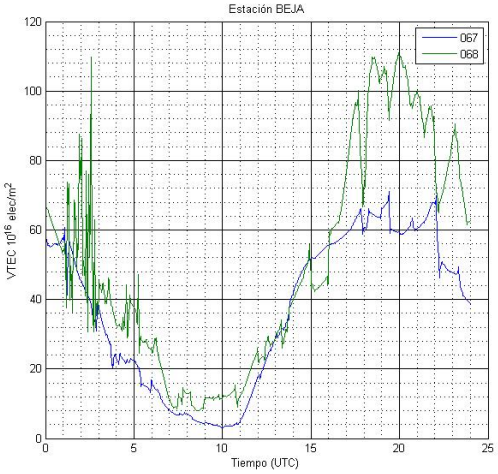
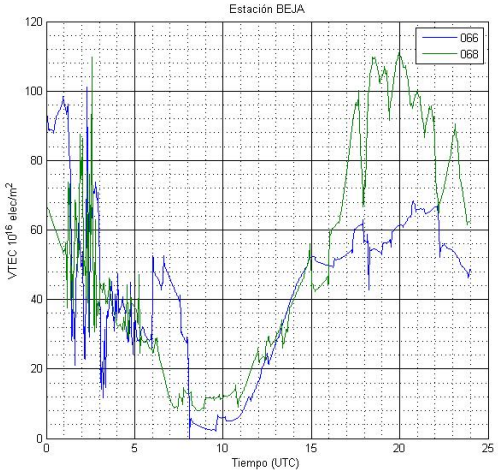


Figura 5.23: BEJA 068. Comportamiento VTEC



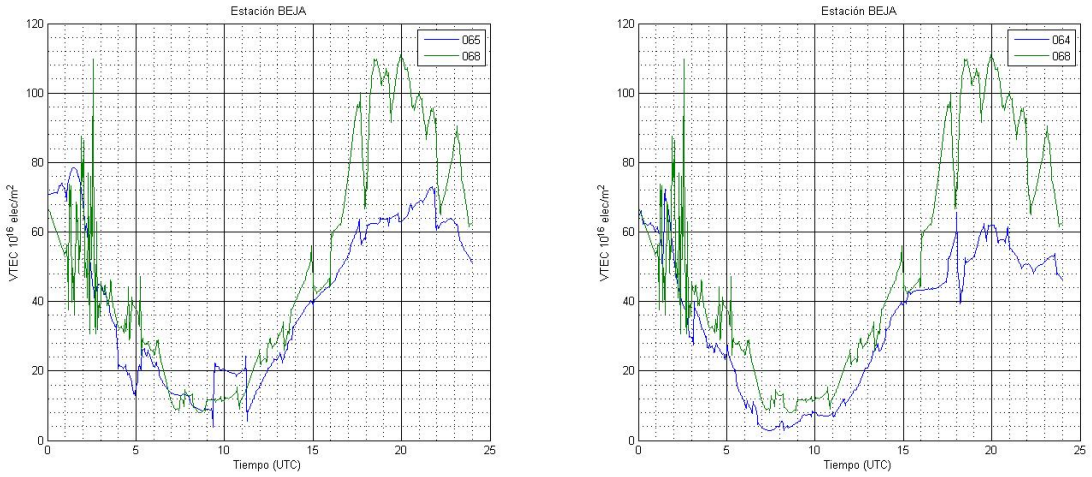
(a) Comparativo estación BEJA 068 y 067



(b) Comparativo estación BEJA 068 y 066

Figura 5.24: Comparativo de estacionalidad diaria. Día 066 y 067 frente a día 068

viamente, donde en las primeras horas del día 066 en el intervalo $[2^h,\ 5^h]$ presenta un coeficiente de variación entre 24 % y 31 %, donde surge una similitud con la variabilidad encontrada en el mismo intervalo del día 068; sin embargo, para este mismo día el nivel máximo de VTEC encontrado fue de 61,18 unidades cerca de las 20^h y en consecuencia se observa una diferencia porcentual del 44,82 % frente al día previo al evento y de 2,56 % comparado al día 067.



(a) Comparativo estación BEJA 068 y 065

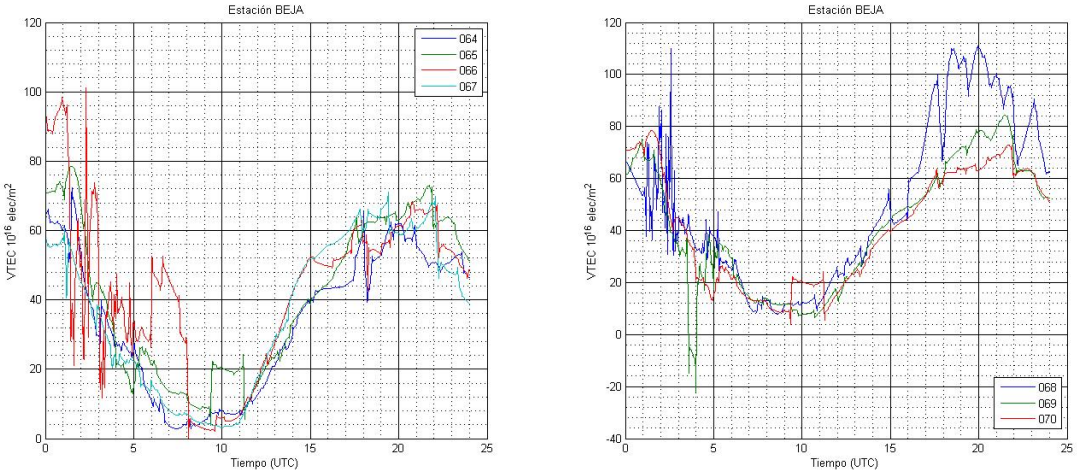
(b) Comparativo estación BEJA 068 y 064

Figura 5.25: Comparativo de estacionalidad diaria. Día 064 y 065 frente a día 068.

Para los días 064 y 065 la tendencia de la curva presentan semejanza y los coeficientes de variación no superan el 14 %; no obstante, cabe resaltar que la diferencia máxima porcentual entre estos periodos y el día 068 hacía las 20^h llega a ser del 44,4 %.

Desde una perspectiva gráfica, se observa en la Figura 5.26(a) como el comportamiento de esta variable sufre pequeñas variaciones entre el 4,34 % y 15 % en los intervalos sobre los que se ha hecho hincapié, aunque corresponde a periodos en los cuales no se registran cambios significativos en los niveles de VTEC que indiquen la presencia o comportamientos anómalos, por lo que ante la evidencia de un incremento en la variabilidad del VTEC estos se asocian a con sucesos sismogénicos.

Con la ocurrencia del terremoto, el comportamiento del VTEC tiende a normalizarse como se muestra en la Figura 5.26(b) bajo las condiciones o tendencia presentada en días anteriores como se observa en la Figura 5.26(a).



(a) Comportamiento VTEC días previos al evento sísmico

(b) Comportamiento VTEC días posteriores al evento sísmico

Figura 5.26: Comportamiento VTEC anterior y posterior al evento sísmico

5.4.2. Estación BNGA

La estación BNGA se encuentra ubicada en la capital del departamento de Santander, cuyas coordenadas geográficas son: 7°6′18″ latitud norte, 73°7′25″ longitud oeste y a una distancia de 39,73 km del epicentro del evento sísmico. Al igual que el caso anterior y dadas la condiciones de esta estación, el periodo de recepción de información no fue de 30 días como se planteó en principio, sin embargo la información registrada es el periodo verosímil para la identificación de anomalías ionosféricas.

Particularmente fueron detectados comportamientos anómalos justo el día previo a la ocurrencia del evento de forma similar a la estación presentada anteriormente pero en menor proporción; por lo cual, se destaca que el comportamiento para los días 068 y 067 registra una tendencia de crecimiento positivo asociada a la variabilidad de los datos correspondientes al día 068 y alcanzando el 29,1 % a las 10^h de este día, tal como se muestra en la Tabla 5.10. No obstante, a pesar de la alta variabilidad mostrada en las primeras horas, los valores VTEC alcanzados tanto para el día 067 y 068 tienden a ser bastante similares en el intervalo $[12^h, 18^h]$; posterior a este evento, la curva correspondiente al día 068 se desprende de su anterior, para lograr el tope de unidades VTEC no alcanzado en días anteriores ni posteriores a este registro y que en condiciones similares a la estación BEJA se presenta previo a la ocurrencia del evento sísmico; es decir, entre las 19^h y 20^h alcanza 84.52 unidades frente a las 58.65 registradas en el día inmediatamente anterior que representa un incremento de 30,60 %. Este comportamiento que surge aproximadamente hacía las 18^h y se prolonga hasta las 22^h de acuerdo a la Figura 5.27(a), los incrementos

porcentuales se sostienen por encima del 30 % donde para las 19^h es de 30,2 %, para las 20^h es de 39 %, a las 21^h de 36,1 % y el último segmento alcanza 16 %.

Día / Hora	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h	6^h	7^h	8^h	9^h	10^h
067	17,5 %	17,7 %	23,7 %	20,9 %	15,9 %	13 %	17,7 %	18,1 %	19,1 %	24,3 %	14,5 %
068	11,1 %	13,5 %	15,4 %	15,6 %	15,9 %	20,6 %	28,9 %	35,5 %	25,7 %	28,1 %	29,1 %

Cuadro 5.10: Coeficiente de Variación para el día 067 y 068 en el intervalo [0^h y 10^h]

El análisis respecto al día 066 frente al día 068 arrojó resultados similares, en primer lugar es de destacar que el día 066 presenta una variabilidad que va desde 14,12 % hasta 25,10 % entre la 1^h y la 4^h; el aparente paralelismo entre las curvas es registrado en el intervalo $[12^h, 15^h]$ y a partir de allí son registrados cambios porcentuales en la unidades de VTEC alcanzadas que llegan a ser del orden de 27,54 % alrededor de las 20^h y tienden a acoplarse las curvas luego de las 22^h.

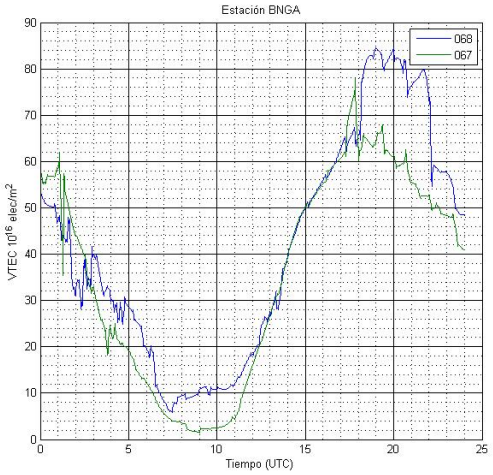
Siendo singular a los resultados expuestos a través de los comparativos el periodo 065 y 068, el primero presenta particularidades tales como: el aparente paralelismo entre las curvas VTEC analizadas es registrado durante un lapso mayor al encontrado en días precedentes, teniendo lugar este entre las 11^h y 18^h (Ver Figura 5.27(c)). En ese mismo sentido, las unidades de VTEC son superiores a las vistas en el día 066 y 067, por ejemplo; más tienden a ser bastante similares a las registradas en el día anterior al evento sísmico, de hecho las diferencias porcentuales encontradas no fueron superiores al 15 % en el intervalo de mayor probabilidad asociada a la aparición de anomalías.

En lo precendente al evento sísmico, las tendencias de las curvas representativas del Contenido Total de Electrones fueron similares y las variaciones estuvieron oscilando entre el 5 % y 40 %. De otra parte, el día del evento y posterior a este, las unidades de VTEC principalmente son inferiores a las registradas previo al sismo, con tendencia a normalizarse a los valores registrados en días que no presentan anomalías o eventos sismogénicos.

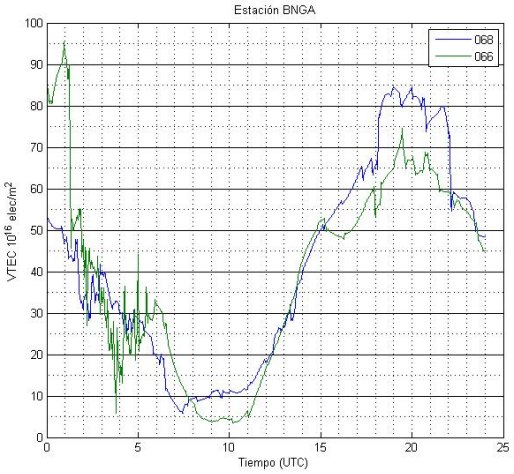
5.4.3. Estación PAMP

La estación PAMP ubicada en el municipio de Pamplona en el departamento de Norte de Santander cuyas coordendas geográficas son: $7°23'3''$ latitud norte, $72°38'53''$ longitud oeste y a una distancia de 78,14 km del epicentro del evento. A diferencia de las estaciones presentadas, en el caso de la estación PAMP se contó con la totalidad de las observaciones diarias a excepción del día 059 del cual no existe registro.

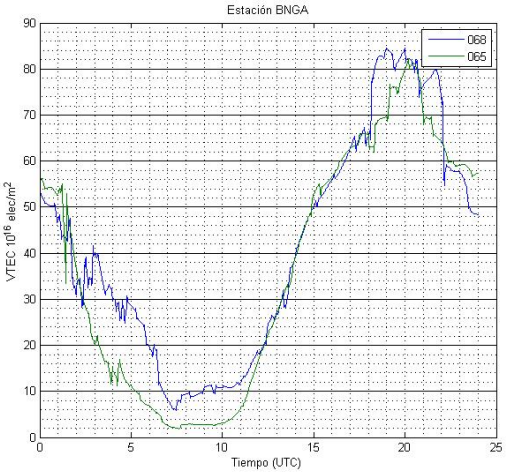
A pesar de no encontrarse dentro de los casos de estudio de la presente investigación y de la misma forma en la que se han venido develando ciertos comportamientos del Con-



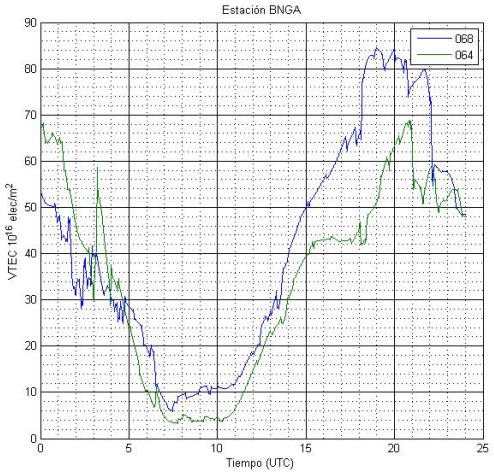
(a) Comparación del comportamiento VTEC entre 067 y 068



(b) Comparación del comportamiento VTEC entre 066 y 068

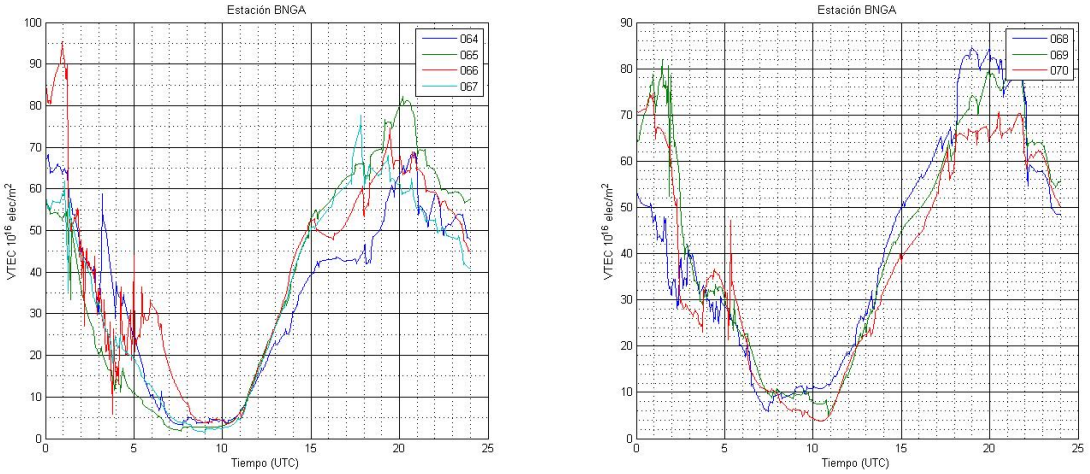


(c) Comparación del comportamiento VTEC entre 065 y 068



(d) Comparación del comportamiento VTEC entre 064 y 068

Figura 5.27: Comparación del comportamiento Estación BNGA



(a) Comparación días previos al evento sísmico

(b) Comparación día previo, posterior y día del sismo.

Figura 5.28: Análisis comparativo de la variable VTEC de la Estacion BNGA.

tenido Total de Electrones en la ionosfera, se identificó un incremento desmesurado en los niveles de VTEC para el día 055, teniendo lugar un pequeño sismo posterior a esta inusual conducta ionosférica. Registrado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos; este sismo se presentó en cercanías a la ciudad de Umuquena en el estado del Tachira (Características del sismo son mencionadas en la Tabla 5.12); las anomalías ionosféricas encontradas tuvieron lugar en el intervalo [9^h y 10^h] del día en cuestión en cuanto la variabilidad porcentual de los datos no habían sido registrados de tal magnitud en el presente trabajo, encontrándose una variación máxima del 91,9 % entre las 9^h y 10^h y un mínimo de 31,32 % entre las 6^h y 7^h, en contraposición con el registro de este mismo coeficiente para el día 054, donde el valor máximo tan solo fue de 32,3 % y un mínimo de 13,9 %.

Día / Hora	0^h	1^h	2^h	3^h	4^h	5^h	6^h	7^h	8^h	9^h	10^h
054	20,9 %	13,9 %	8,96 %	21 %	14 %	14,5 %	20,47 %	32,3 %	24,8 %	17,46 %	14,8 %
055	41,4 %	35,1 %	54,3 %	63,9 %	59,7 %	32,9 %	31,3 %	46 %	77,9 %	91,9 %	67,3 %

Cuadro 5.11: Coeficiente de Variación de la Estación PAMP para el día 054 y 055 en el intervalo [0^h y 10^h]

Por lo tanto, al comparar las curvas representativas del día 054 y 055 se encontró el incremento desmesurado mencionado previamente, entre las 20^h y 24^h, donde para el día

Característica	Detalle
Magnitud	4,1
Profundidad	5 km
Ubicación	8°13′48″N 72°7′12″W
Fecha	Febrero 26 de 2015
Hora	10^h46^m UTC
Región	Sur oeste Venezolano

Cuadro 5.12: Características del evento sísmico. Umuquena, Tachira

055 el VTEC alcanzó a las $23{,}23^h$ 102,4 unidades en contraposición a las 42,54 unidades registradas el día anterior a la misma hora, esto significa que hubo un incremento del 58,45 %, no encontrado en las estaciones precedentes. De la misma forma, los niveles de VTEC tienden a normalizarse con la ocurrencia del sismo y presentan variaciones que para este caso son de 16,55 %.

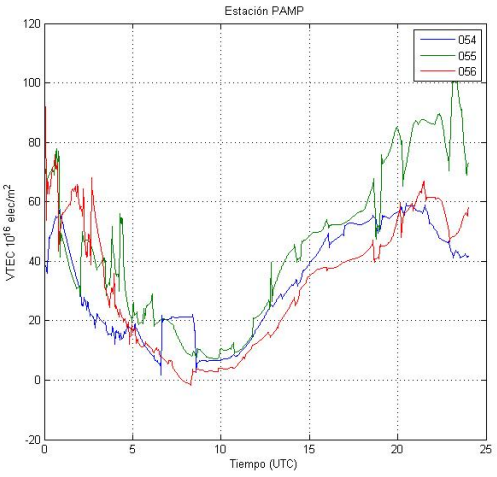
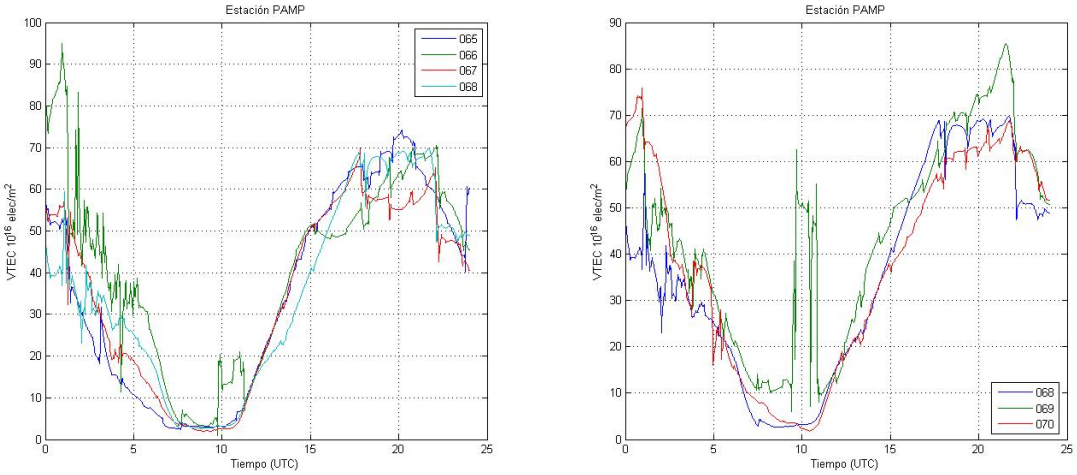


Figura 5.29: Comportamiento VTEC Estación PAMP 054, 055 y 056

Ahora bien, respecto al sismo ocurrido en los Santos, Santander, para la estación PAMP no se encontraron comportamientos anómalos en los periodos en los fueron registrados para otras estaciones, es decir las diferencias porcentuales en los niveles de VTEC no superaron el orden de 15 % encontrado entre el día 066 y 068. No obstante, se registra en el día 066 una alta variabilidad de los datos que oscila entre el 9 % y 47 % hacía la 1^h y hasta7^h. Sin embargo y en contradicción a previos hallazgos, el día previo al evento

solo presentó una variación porcentual máxima de 9,69 % hacía las 21^h respecto al día predecesor.



(a) Comportamiento VTEC Estación PAMP 065, 066, 067 y 068

(b) Comportamiento VTEC Estación PAMP 068, 068 y 070

Figura 5.30: Estación PAMP 065 a 070

Diferente a lo registrado anteriormente, el día del evento sísmico justo a la hora de ocurrencia, el comportamiento del VTEC fue de 85,47 unidades frente a 68,76 registradas en el día inmediatamente anterior, dando así lugar a un cambio porcentual de 22,8 %; en tal sentido, para esta estación no se evidencia la aparición de anomalías ionosféricas previos a este movimiento telúrico, más sin embargo, posterior a este se observan aumentos de VTEC pasada 1^h de la ocurrencia del evento; en cuanto a los días ulteriores descienden las unidades VTEC hasta niveles de normalidad. Por lo tanto, cabe resaltar que el único indicio encontrado respecto a esta estación esta relacionado con la alta variabilidad que se presentó en el día 066.

5.4.4. Análisis Espacial II

Se buscó establecer las anomalías ionosféricas locales desde una perspectiva espacial en el mismo sentido en el que fueron evidenciadas a través del análisis presentado en las secciones anteriores. Por lo tanto, se establecieron comparativos de estacionalidad horaria entre los periodos evaluados a través de la construcción de mapas de interpolación espacial por el método *kriging ordinario* sobre la región de estudio, cabe resaltar que para dicho procedimiento se concatenaron la totalidad de las observaciones provistas por cada estación,

sin embargo se conserva el criterio de segregación de las mediciones respecto al angulo cenital. Ahora bien, las anomalías ionosféricas registradas tuvieron lugar principalmente en el día previo a la ocurrencia del sismo sobre el intervalo de de mayor exposición a la radiación solar, es decir entre las 15^h y 23^h.

Por lo tanto, a partir de las 15^h inicia el incremento de las unidades VTEC; en ese sentido, la variabilidad de los datos es inferior al 15 % y es evidenciado un ambiente que propende a aumentar su estado de ionización, fenómeno que fundamentalmente tiene una dirección norte occidente - sur oriente y alcanza un máximo promedio de 50 unidades. Sin embargo, respecto a los días 063 y 066 la ionización es relativamente superior donde para el primer caso tiene una dirección norte - sur y alcanza 60 unidades en la zona más austral; en cuanto al día 066 el ambiente se registra en sentido norte oriente - sur occidente. No obstante, los cambios registrados solo representan una diferencia del 16 % en promedio.

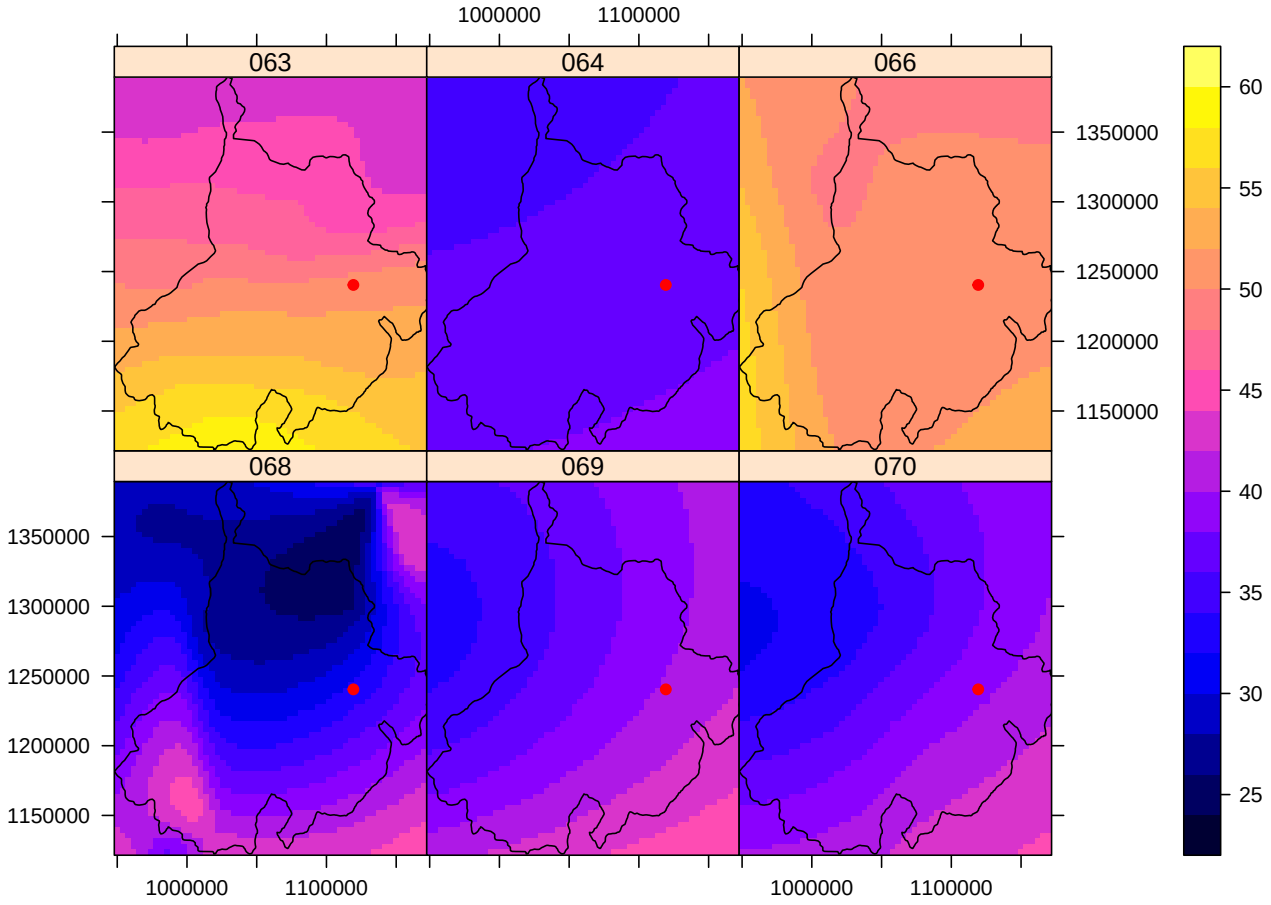


Figura 5.31: Comportamiento VTEC entre 15^h y 16^h

Posteriormente entre las 18^h y 19^h el incremento es registrado entre 10 y 15 unidades respecto al intervalo previo. La orientación de los incrementos VTEC son conservados para los días 063, 064, 066 y 070, en ese sentido se mantienen altos niveles VTEC para el primer caso respecto a los evaluados en otros días, no obstante para el día del evento no muestra una clara dirección en la cual los niveles VTEC aumenten significativamente. En cuanto al día previo al evento, la orientación cambia en sentido norte oriente - sur occidente; sin embargo no son registrados aumentos desmesurados de VTEC. Se destaca principalmente que las áreas con menor ionización corresponden a las ubicadas al norte en todos los casos y por consiguiente las regiones de mayor ionización se encuentran al sur de la zona de estudio, no obstante la ionosfera en el periodo 069 no presenta ninguna dirección significativa de crecimiento o decremento en oposición a lo mencionado.

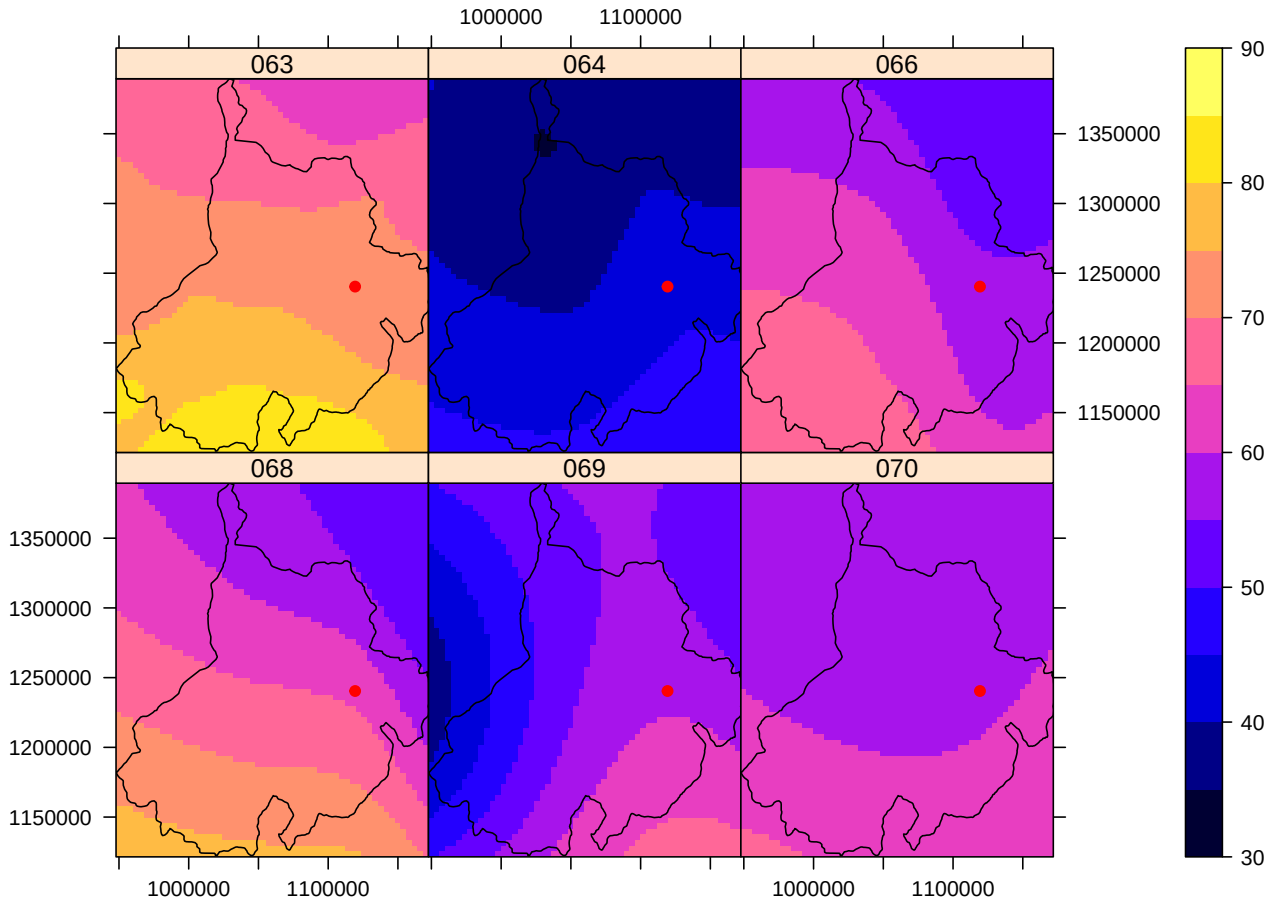


Figura 5.32: Comportamiento VTEC entre 18^h y 19^h

La ionización sigue en aumento con el transcurrir del tiempo, y ha de resaltarse que el análisis se desarrolla sobre el intervalo más crítico, dado que son registrados en primer

lugar lo mayores valores VTEC y particularmente las regiones sobre las que se encuentra. Los días 063, 064, y 066 presentan una variabilidad de alrededor del 20 % y el sentido de mayor ionización se mantiene, siendo más significativo para 064. Ahora bien, respecto al día 068 los niveles de VTEC alcanzan un constante entre 65 y 75 VTEC sobre gran parte de la región de estudio y particularmente se observa un incremento de 120 unidades hacía el sur occidente que representa un diferencia en promedio de 45 %. Este incremento al que se denominará punto caliente ionosférico está circundado al norte por registros entre 40 y 60, mientras que al norte occidente y al sur las unidades oscilan por el orden de 10 y 40 unidades, siendo estos últimos los mínimos registrados en el análisis para este periodo.

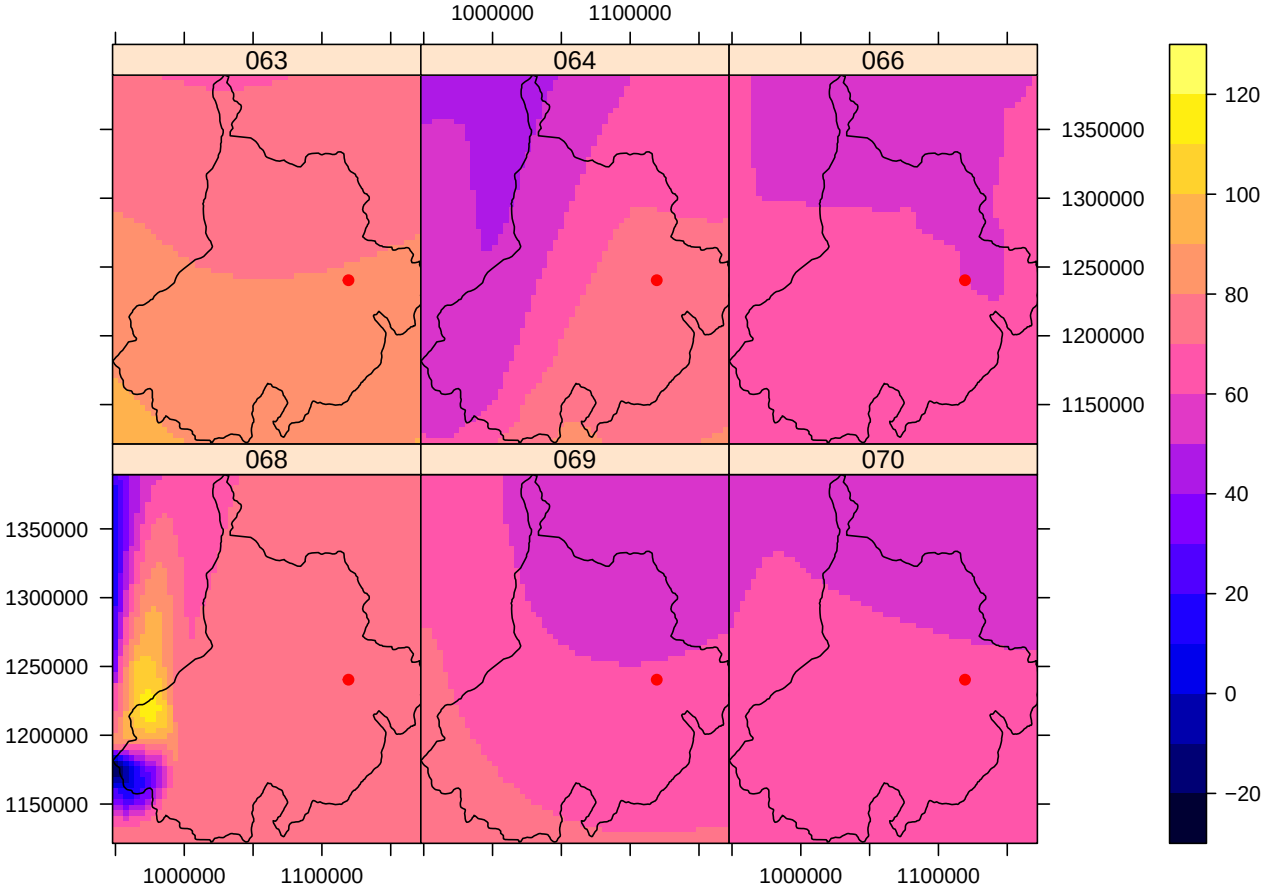


Figura 5.33: Comportamiento VTEC entre 20^h y 21^h

Se centra el análisis sobre el día 068 en el intervalo de tiempo comprendido entre 19^h y 23^h. En primer lugar, únicamente se observa el incremento hacía las 19^h en dirección norte occidente - sur oriente y siendo este el intervalo con menor variabilidad. Posteriormente, hacía las 20^h es registrado el punto caliente ionosférico descrito anteriormente que aunque

se encuentra a una distancia aproximada de 309 km del epicentro del evento (Epicentro del evento es representado en el mapa por un punto rojo) es asociado a la ocurrencia posterior del movimiento sísmico. Dicho singular comportamiento no es registrado en días anteriores ni posteriores desde el sentido espacial en que ocurre el fenómeno y tampoco en el sentido de las unidades alcanzadas.

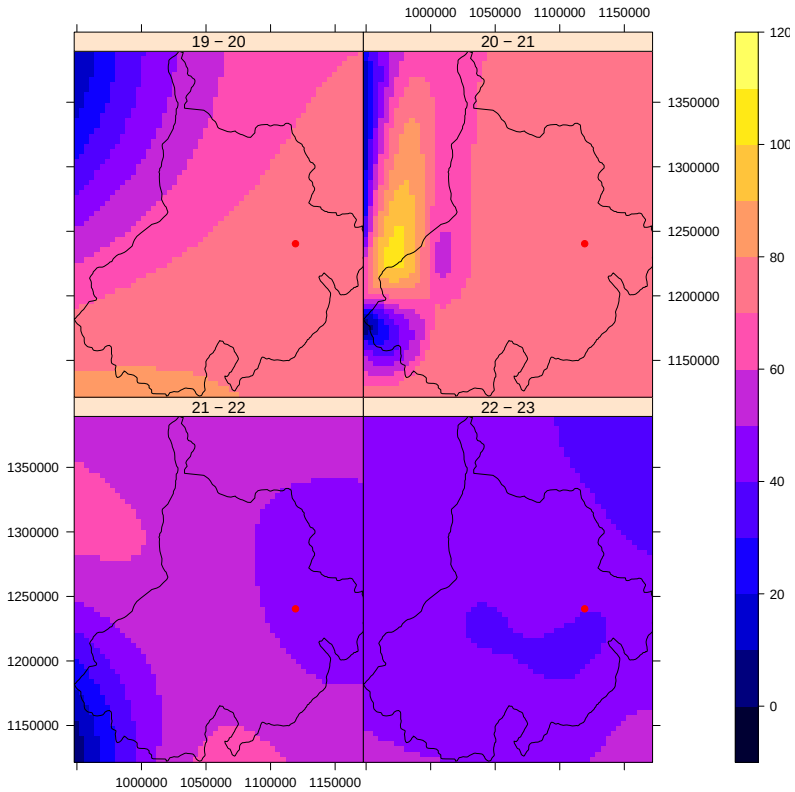


Figura 5.34: Comportamiento VTEC día previo al evento entre 19^h y 23^h

Posterior a este suceso, la ionosfera tiende a disminuir sus niveles de VTEC, de esta forma para las 22^h tan solo se alcanzan entre 30 y 65 unidades; sin embargo no se evidencia dirección alguna para el decremento mencionado dado que persiste la variabilidad de las mediciones pero existe la natural disminución y posterior cese de exposición solar.

En la ocurrencia del evento sísmico, el nivel VTEC no tienen connotación de anomalía dado que los correspondientes registros en periodos previos y posteriores son parcialmente homogéneos a diferencia por supuesto del día previo. En ese sentido, cabe resaltar que tiende a desaparecer la alta variabilidad de los datos y se retoma la dirección norte - sur de crecimiento que para las 22^h corresponde a decrementos.

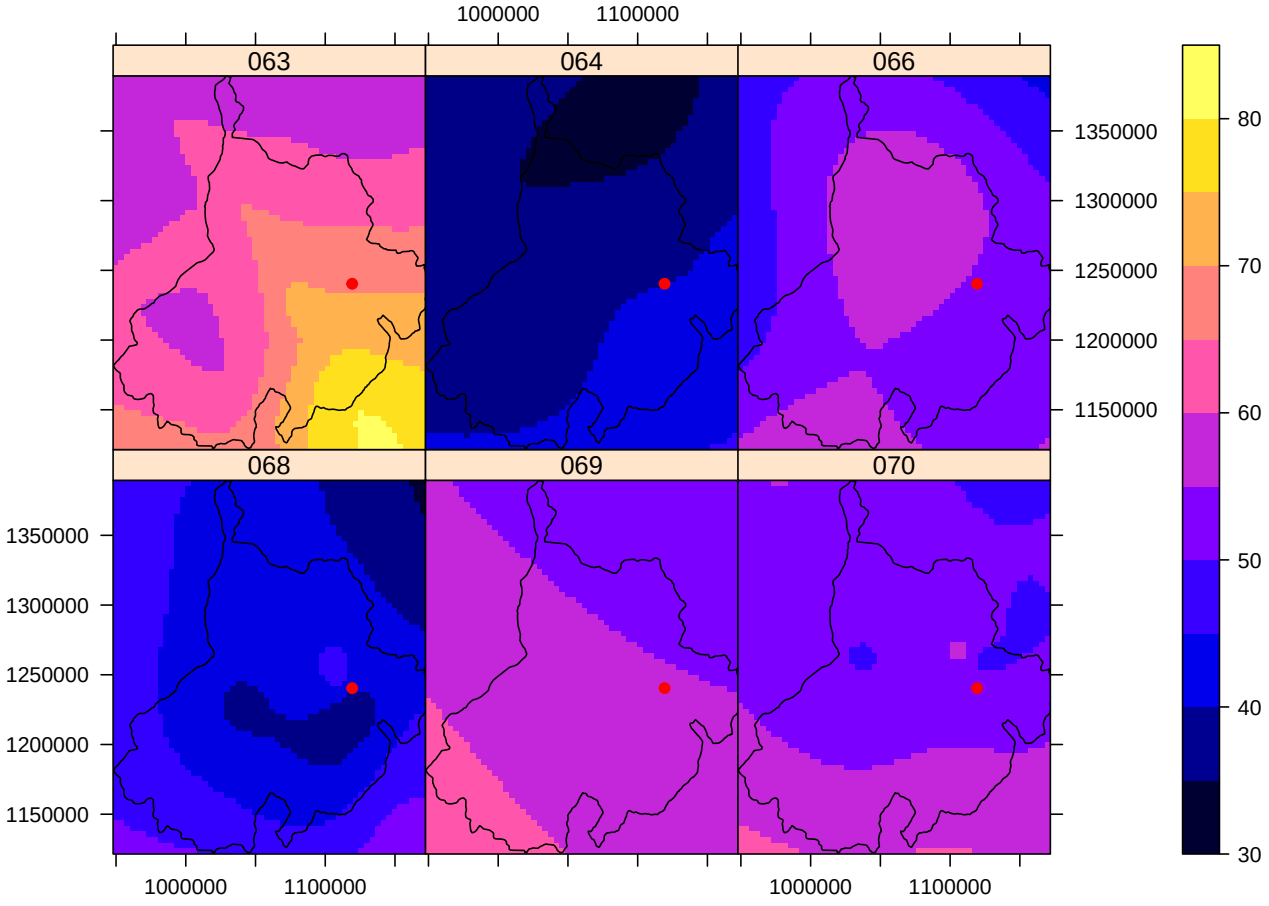


Figura 5.35: Comportamiento VTEC entre 22^h y 23^h

Capítulo 6

Conclusiones

Como resultado de esta investigación son registradas anomalías ionosféricas en días previos a la ocurrencia de los eventos sísmicos, comportamientos que principalmente están basados en incrementos significativos de los niveles VTEC y asociados a una alta variabilidad. Además se encontró que los cambios más acentuados y por supuesto, siendo esto de esperarse, en la mayoría de los casos evaluados la aparición de conductas inusuales ionosféricas tuvieron lugar sobre los periodos de mayor exposición a la radiación solar, sin embargo existen excepciones.

Particularmente para el estudio de caso La Vega, se encontró en el periodo comprendido entre el día 259 hasta el día 265 un ambiente ionizado en aparente estado de normalidad cuyo reiterativo fenómeno VTEC en el tiempo es afectado por factores de los que se desconoce su origen y donde registra en primera instancia un aumento en los coeficientes de variación que osciló entre el 30 % y 50 %, suceso que tuvo lugar 7 días previo a la ocurrencia del evento. En segunda instancia, la aparición de incrementos en promedio del 50 % registrados 3 días antes del sismo y que paulatinamente desaparecen y tienden a ajustarse a los niveles encontrados en días de aparente normalidad ionosférica.

Respeto al evento sísmico en Los Santos, los incrementos en los niveles VTEC son registrados de manera semejante, alcanzando el orden de 50 % 24 horas antes a la ocurrencia del terremoto; sin embargo, no se presenta una alta variabilidad de la información. Ahora bien, analizado desde la perspectiva espacial, efectivamente se desarrolla el fenómeno en inmediaciones al epicentro del evento, haciendo énfasis en su particular configuración espacial donde altos niveles VTEC se concentran sobre un punto específico en el espacio y que se distribuye semejante a una onda esférica donde los frentes de ondas singularmente describen formas elipsoidales, no obstante la fuente de esta distribución espacial se encuentra distanciada del epicentro del evento.

Evidentemente para los casos de estudio, la aparición de anomalías ionosféricas estuvieron relacionadas con la posterior ocurrencia del terremoto, siendo la detección temprana

de estos la detección temprana de sismos; sin embargo, a pesar de las diferencias en los niveles VTEC y la variabilidad de los mismos no es posible establecer parámetros como la magnitud o la intensidad del terremoto, tanto más aún el epicentro del evento pese a que se haya encontrado un fenómeno espacial tan contundente como el registrado en Los Santos.

De otra parte, la perdida de información vista fundamentalmente en las estaciones asociadas al sismo de Los Santos no permitió evidenciar completamente el comportamiento ionosférico 15 días previo y posterior a la ocurrencia del evento; no obstante y a pesar de ello las anomalías ionosféricas en efecto existen y se presentan las condiciones mencionadas.

Capítulo 7

Recomendaciones

La investigación geofísica de la alta atmósfera es aún incipiente para latitudes ecuatoriales tanto más lo es para el país; en ese sentido se destacan los trabajos de maestría desarrollados por [Palacios, 2010] y [Parra, 2014] enfocados principalmente en el cálculo del Contenido Total de Electrones; sin embargo, se abre un camino expedito para la construcción de modelos que permitan a partir de simulaciones estadísticas la predicción de la variable VTEC tanto del futuro como del pasado a partir de la constante información que se recepciona en tierra, esto con el fin de establecer medidas estadísticas más rigurosas para la determinación de este tipo de anomalías.

Indudablemente debe buscarse los factores causa de la excitación ionosférica que conlleva a los altos registros encontrados, por lo tanto nos encontramos ante el desafío de confirmar hipótesis que proponen la emanación de elementos desde el interior de la corteza hasta complejas interacciones de la atmósfera con el espacio exterior.

En cuanto al desarrollo metodológico llevado a cabo en esta investigación y dado su alto contenido empírico he de resaltar los siguientes hechos:

1. Debe experimentarse a profundidad sobre el ángulo cenital sobre el cual son discriminadas ciertas mediciones, probablemente asociado a la latitud.

2. La determinación de la función Wavelet madre de mejor ajuste a los datos se propone realizar en primer lugar de manera independiente sobre las estaciones objeto de estudio y en segunda instancia establecer otros parámetros de evaluación como la entropía.

3. Pese a que los resultados obtenidos a partir de las interpolaciones espaciales fueron contundentes, se recomienda hacer especial énfasis en la construcción de los modelos de correlación espacial, así también la realización de experimentos con modelos determinísticos con el fin de evidenciar cual de ellos genera mejores resultados para disminuir el rango de aletoriedad espacial de la ocurrencia del evento sísmico.

Bibliografía

[Acevedo Martinez, 2009] Acevedo Martinez, L. (2009). *Computación Paralela de la TransformadaWavelet; Aplicaciones de la transformada Wavelet al álgebra lineal numérica.* Tesis de Doctorado, Universidad Polítécnica de Valencia.

[Acosta, 1986] Acosta, C. (1986). TECTÓNICA DE FRACTURAS EN EL SUROESTE DE COLOMBIA. *GEOLOGÍA COLOMBIANA*, 15:135–148.

[Begoña, 2009] Begoña, I. (2009). ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN DE UN CAMBIADOR DE TOMAS EN CARGA.

[Beltrán y Colmenares, 2011] Beltrán, O. y Colmenares, C. (2011). APLICACIÓN DE ONDELETAS EN DATOS DE GEOPOSICIONAMIENTO CONTINUO PARA LA REGIÓN COLOMBIANA CON FINES GEODINÁMICOS. *UD y la Geomatica*, pages 92–102.

[Breit y Tuve, 1926] Breit, G. y Tuve, M. A. (1926). A test of the existence of the conducting layer. *Phys. Rev.*, 28:554–575.

[Burrus et al., 1998] Burrus, S., Ramesh, G., y Gou, H. (1998). *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms.* Pretince Hall, New Jersey.

[Calais y Minster, 1998] Calais, E. y Minster, J. (1998). GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105(3-4):167–181.

[Camilion, 2013] Camilion, E. (2013). *Formulación del LPIM en base a las leyes fundamentales del plasma ionosférico.* Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de la Plata.

[Castro y Castro, 1988] Castro, L. y Castro, S. (1988). Wavelets y sus aplicaciones. *1 Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, page 195:205.

[Chaovalit et al., 2011] Chaovalit, P., Gangopadhyay, A., Karabatis, G., y Chen, Z. (2011). Discrete wavelet transform-based time series analysis and mining. *ACM Computing Surveys*, 43(2):1–37.

[Chuvieco, 1996] Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ed. Rialp, Madrid.

[Cid Torturero, 2003] Cid Torturero, C. (2003). *ESTUDIO DE EYECCIONES DE MASA DE LA CORONA SOLAR EN EL MEDIO INTERPLANETARIO*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid.

[Cipagauta, 2007] Cipagauta, E. (2007). *DINÁMICA DE LA IONOSFERA EN LATITUDES BAJAS*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

[Dabas et al., 2007] Dabas, R. S., Das, R. M., Sharma, K., y Pillai, K. G. M. (2007). Ionospheric pre-cursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(15):1813–1824.

[Dasdemir et al., 2015] Dasdemir, Y., Yildirim, S., y Yildirim, E. (2015). Classification of emotion primitives from eeg signals using visual and audio stimuli. In *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015 23th*, pages 2250–2253.

[Eckley, 2001] Eckley, I. A. (2001). *Wavelet Methods for Time Series and Spatial Data*. Tesis de Doctorado, University of Bristol.

[Gambosi, 1998] Gambosi, T. (1998). *Physics of the Space Environment*. Cambrigde University Press.

[Goswani y Chan, 2012] Goswani, J. y Chan, A. (2012). *Fundamentals of WAVELTS. Theory, Algorithms, and Applications*. Wiley, 2 edición edition.

[Hargreaves, 1992] Hargreaves, J. (1992). *The solar-terrestrial enviroment*. Cambrigde University Press.

[Ingersoll, 1983] Ingersoll, A. (1983). *La Atmófera*.

[Jusoh et al., 2008] Jusoh, M. H., Ya'Acob, N., Saad, H., Sulaiman, A. A., Baba, N. H., Awang, R. A., y Khan, Z. I. (2008). Earthquake prediction technique based on GPS dual frequency system in equatorial region. *2008 IEEE International RF and Microwave Conference, RFM 2008*, pages 372–376.

[Kaplan y Hegarty, 2006] Kaplan, E. y Hegarty, C. (2006). *UNDERSTANDING GPS, PRINCIPLES AND APPLICATIONS*.

[Kumar et al., 2014] Kumar, Y., Dewal, M., y Anand, R. (2014). Epileptic seizures detection in eeg using dwt-based apen and artificial neural network. *Signal, Image and Video Processing*, 8(7):1323–1334.

[Lambrou et al., 1998] Lambrou, T., Kudumakis, P., Speller, R., Sandler, M., y Linney, A. (1998). Classification of audio signals using statistical features on time and wavelet transform domains. In *Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on*, volume 6, pages 3621–3624 vol.6.

[López et al., 2009] López, M., Moreno-Sanchez, M., y Audemard, F. (2009). DEFORMACIÓN TECTÓNICA RECIENTE EN LOS PÍE DE MONTES DE LAS COORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA. *Boletín de Geología*, 31:11–29.

[Lyon, 2000] Lyon, J. (2000). The Solar Wind-Magnetosphere-Ionosphere System. *Science Magazine*, 288:1987–1991.

[Mallat, 1989] Mallat, S. (1989). A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *Pami*, 11(7):674–693.

[Malone, 1997] Malone, T. (1997). Building on the Legacies of the International Geophysical Year. *AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 78:185–196.

[Mautz et al., 2005] Mautz, R., Ping, J., Heki, K., Schaffrin, B., Shum, C., y Potts, L. (2005). Efficient spatial and temporal representations of global ionosphere maps over Japan using B-spline wavelets. *Journal of Geodesy*, 78(11-12):662–667.

[Medina y Lizarazo, 2004] Medina, J. y Lizarazo, I. (2004). *Fusión de imágenes satelitales usando la transformada de Wavelet*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

[Mohino Harris, 2005] Mohino Harris, E. (2005). *Análisis y mitigación del error ionosférico en los sistemas globales de navegación por satélite con receptores de una frecuencia*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid.

[Nason, 2008] Nason, G. (2008). *Wavelet Methods in Statistics with R*. Springer.

[Palacios, 2010] Palacios, J. C. (2010). CÁLCULO DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES (TEC) EN LA IONOSFERA COLOMBIANA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE RASTREO SATELITAL (REICO). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.

[Parra, 2014] Parra, W. (2014). Cálculo del Contenido Total de Electrones-TEC , para la Ionósfera Colombiana. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.

[Percival, 2008] Percival, D. (2008). Analysis of geophysical time series using discrete wavelet transforms: An overview. *Nonlinear Time Series Analysis in the Geosciences*, pages 61–79.

[Pérez, 2001] Pérez, A. (2001). Marconi: Crónica de una gesta. *Universidad Politécnica de Madrid*, 120:1–10.

[Prieto et al., 2012] Prieto, G. a., Beroza, G. C., Barrett, S. a., López, G. a., y Florez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*, 570-571:42–56.

[Pulinets et al., 2003] Pulinets, S. a., Legen'ka, a. D., Gaivoronskaya, T. V., y Depuev, V. K. (2003). Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(16-18):1337–1347.

[Reinisch, 2014] Reinisch, B. (2014). Ionosphere and Plasmasphere Electron Density Profiles.

[Rishbeth, 1998] Rishbeth, H. (1998). How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(14):1385–1402.

[Rivas Trujillo, 2009] Rivas Trujillo, E. (2009). *DETECCIÓN DE AVERÍAS EN CARGA DE TRANSFORMADORES BASADO EN EL PATRÓN DE VIBRACIONES*. Tesis de Doctorado, Universidad Carlos III de Madrid.

[Ruiz, 2014] Ruiz, M. (2014). *Evolución dinámica de la turbulencia en el viento solar*. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires.

[Sanchez-Rojas y Palma, 2014] Sanchez-Rojas, J. y Palma, M. (2014). Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data. *Tectonophysics*, 634:97–115.

[Sardón et al., 1993] 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.

[Schaer, 1999] Schaer, S. (1999). *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. Tesis de Doctorado, Escuela Politécnica Federal de Zurich.

[Sendiña y Pérez, 2006] Sendiña, I. y Pérez, V. (2006). *Fundamentos de Meteorología*. Universidade de Santiago de Compostela.

[Shunck y Nagy, 2009] Shunck, R. y Nagy, A. (2009). *Ionospheres Physics, Plasma Physics, and Chemestry*. Cambridge University Press.

[Stewart, 1861] Stewart, B. (1861). On the Great Magnetic Disturbance Which Extended from August 28 to September 7, 1859, as Recorded by Photography at the Kew Observatory. *The Royal Society*, 151:423–430.

[Stolojescu, 2011] Stolojescu, L. (2011). *A Wavelet Based Approach for Time Series Mining*. Tesis de Doctorado, POLITEHNICA UNIVERSITY OF TIMISOARA TELECOM BRETAGNE.

[Taboada et al., 1998] Taboada, D., Dimaté, C., y Fuenzalida, A. (1998). Sismotécnica de Colombia: Deformación Continental Activa y Subducción. *Física de la Tierra*, 10:114–147.

[Theerapatpaiboon et al., 2005] Theerapatpaiboon, P., Leelaruji, N., Hemmakorn, N., y Supnithi, P. (2005). The Effects of Sumatra-Andaman Earthquake on Total Ionospheric Electron Content (TEC) and Ionospheric Scintillation of GPS Signal in Thailand. *2005 5th International Conference on Information Communications & Signal Processing*, pages 1183–1186.

[Vargas y Pedraza, 2011] Vargas, C. y Pedraza, F. (2011). Nueva falla geológica altera mapa de amenaza sísmica en Colombia. Reporte técnico, UN Periódico.

[Wang et al., 1997] Wang, J. Z., Wiederhold, G., Firschein, O., y Wei, S. X. (1997). Content-based image indexing and searching using Daubechies' wavelets. *International Journal on Digital Libraries*, 1(4):311–328.

[Zarifi et al., 2007] Zarifi, Z., Havskov, J., y Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics*, 443(1-2):93–105.

[Zou y Zhao, 2010] Zou, Y. y Zhao, T. (2010). Ionospheric anomalies detected by GPS TEC measurements during the 15 August 2007 Peru earthquake. *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010 International Conference on*, pages 1216–1219.