



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO EN INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TEMA: ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD IONOSFÉRICA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES
OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS GNSS.**

**AUTORES: MUGLISA MEDINA, JONATHAN DANIEL
PILLAJO VEGA, MÓNICA SOFÍA**

DIRECTOR: ING. LUNA, MARCO Msc.

SANGOLQUÍ 2017



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD IONOSFERICA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS GNSS”, elaborado por el señor JONATHAN DANIEL MUGLISA MEDINA y la señorita MÓNICA SOFÍA PILLAJO VEGA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, por lo que me permito acreditarlo y autorizar al Sr. Ing. Wilson Jácome, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 01 marzo del 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Marco Luna'.

Ing. Marco Luna, Msc
DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Jonathan Daniel Muglisa Medina y Mónica Sofía Pillajo Vega declaramos que el trabajo de titulación denominado “ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD IONOSFERICA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS GNSS”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 1 de marzo del 2017

JONATHAN DANIEL MUGLISA MEDINA

MÓNICA SOFÍA PILLAJO VEGA



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Jonathan Daniel Muglisa Medina y Mónica Sofía Pillajo Vega autorizamos la publicación de este trabajo de titulación denominado “ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD IONOSFÉRICA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES OBTENIDAS A PARTIR DE DATOS GNSS”, en la biblioteca virtual de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE; cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 1 de marzo del 2017

Una firma manuscrita en tinta azul, bastante elaborada y con muchos cruces, sobre una línea horizontal.

JONATHAN DANIEL MUGLISA MEDINA

Una firma manuscrita en tinta azul, más sencilla y fluida, sobre una línea horizontal.

MÓNICA SOFÍA PILLAJO VEGA

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado de manera especial:

A nuestros padres, Amparito y Enrique, Elvira y Jaime, por ser el pilar fundamental de nuestras vidas y creer en todo momento en nosotros brindándonos apoyo moral, económico; pero, sobre todo, su comprensión y amor, sin el apoyo de ellos este logro no hubiese sido posible. Además, este proyecto va dedicado a nuestras hermanas, Gabriela Muglisa por siempre alentarme a seguir adelante y cumplir las metas que me he propuesto y a Carolina Pillajo por hacer de mi vida algo diferente y para que tenga en mi un ejemplo de que las cosas con perseverancia y constancia se logran.

A nuestros primos, Kevin Muglisa, Xavi y Pato Salas, Angela Montaguano quienes siempre permanecieron a nuestro lado compartiendo palabras de aliento en momentos difíciles y celebrando cada meta alcanzado a lo largo de nuestra vida.

A nuestros amigos que han permanecido en los buenos y malos momentos de la vida universitaria: Alexandra Quezada, Raquel Castillo, Tnte. Christian Barahora y Cristian Tacuri y de manera especial al Capt. Wilmer Galarza quien siempre supo tener las palabras adecuadas en todo momento y a Santiago Lucero por en tan poco tiempo habernos brindarnos una amistad sincera, han sido personas con quienes hemos compartido momentos que siempre permanecerán en nuestras memorias y con cuales contaremos toda la vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser ese Ser de Luz que siempre ha guiado nuestro camino y aunque sea un ente no físico tenemos la certeza que ha estado presente en cada momento de nuestra vida.

A nuestros padres por ser nuestro ejemplo de vida, por ser las personas que nos permitieron venir a este mundo y que sin tener garantía alguna creyeron en nosotros e hicieron posible que delante de nuestro nombre haya un título universitario.

A nuestros primos, tíos, abuelitos y abuelitas por estar presentes en cada peldaño alcanzado a lo largo de nuestra vida, por inculcarnos valores.

A nuestros amigos y amigas que han estado presentes de forma permanente en nuestras vidas con palabras de aliento, con una mano amiga, por enseñarnos que el camino hacia una meta es cuestión de resistencia mas no de carrera y sobre todo por ser una chispa de felicidad dentro de nuestros corazones.

Al Ing. Marco Luna, nuestro tutor de tesis, por compartirnos sus amplios conocimientos tanto científicos como personales, por ser un excelente profesor universitario y por enseñarnos que las cosas con paciencia y dedicación pueden llegar a lograrse.

De manera general a todos los docentes de la Carrera de Ingeniería Geográfica por impartir sus conocimientos en todas las áreas y por habernos permitido conocer lo magnifico de estudiar esta carrera además de formarnos profesionalmente con ética y buenos valores personales y profesionales.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	I
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición de problema.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Descripción del área de estudio	4
1.5 OBJETIVOS	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO 2.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 SUPERFICIES DE REFERENCIA	7
2.1.1 Sistemas y marcos de referencia	9

2.1.2	Coordenadas Cartesianas Rectangulares	10
2.1.3	Coordenadas geodésicas	10
2.1.4	Relación entre sistemas de coordenadas.....	11
2.2	IONÓSFERA	13
2.2.1	Introducción.....	13
2.2.2	Influencia de elementos externos	14
2.2.3	Regiones y capas ionosféricas	16
2.2.3.1	Región D	17
2.2.3.2	Región E	18
2.2.3.3	Región F.....	18
2.2.4	Propagación de señales electromagnéticas en la ionósfera	19
2.2.5	Retardo ionosférico	21
2.2.6	Modelos ionosféricos	23
2.3	CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES	25
2.3.1	Concepto.....	25
2.3.2	Tipos de TEC.....	26
2.4	ALGORITMO DE KLOBUCHAR	27
2.4.1	Historia del modelo	27
2.4.2	Consideraciones.....	28
2.4.3	Variables.....	31
2.4.4	Cálculos	33
2.4.4.1	Ángulo al centro de la Tierra	34
2.4.4.2	Latitud y longitud geodésicas del punto subionosférico.....	36
2.4.4.3	Tiempo local	37
2.4.4.4	Factor de inclinación.....	37

2.4.4.5	Periodo, amplitud, fase, retraso ionosférico y TEC.....	38
2.4.5	Limitaciones del modelo	40
2.5	SERIES TEMPORALES	40
2.5.1	Análisis de tendencia.....	41
2.5.2	Estacionalidad	42
CAPÍTULO 3.....		50
METODOLOGÍA		50
3.1	PREPARACIÓN DE DATOS	50
3.1.1	Archivos RINEX.....	50
3.1.2	Archivos de Efemérides Precisas	51
3.2	PROCESAMIENTO	52
3.2.1	Satélites observados por Estaciones REGME.....	53
3.2.2	Coefficientes ionosféricos	55
3.2.3	Coordenadas precisas de satélites observados	56
3.3	CÁLCULO DE TEC	58
3.3.1	Transformación de coordenadas	59
3.3.2	Algoritmo de Klobuchar	59
3.4	GENERACIÓN DE SERIES TEMPORALES.....	59
CAPÍTULO 4.....		65
ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....		65
4.1	GENERACIÓN DE MODELOS	65
4.1.1.	Análisis de tendencia	67
4.1.2.	Análisis de estacionaridad	68
4.1.3.	Análisis de estacionalidad.....	70
4.2	MODELAMIENTO DE LAS SERIES DE TIEMPO.....	75

4.3	EXTRAPOLACIÓN DE MODELOS AJUSTADOS A SERIES	85
CAPÍTULO 5	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1.	Conclusiones	87
5.2.	Recomendaciones.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución convencional del espectro radioeléctrico	20
Tabla 2. Porcentaje de valores atípicos eliminados	66
Tabla 3. Coeficientes de la regresión lineal	68
Tabla 4. Periodos fundamentales seleccionados y RMS.....	73
Tabla 5. Porcentajes de reiteración de periodos fundamentales.	74
Tabla 6. Periodos fundamentales de Enero 2010	75
Tabla 7. Varianzas muestrales de dos poblaciones (con y sin tendencia).....	77
Tabla 8. Valores de la prueba de F obtenidos	79
Tabla 9. Valores de RMS para los modelos matemáticos.....	83
Tabla 10. RMS de modelos de predicción	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las estaciones GNSS de monitoreo continuo.....	5
Figura 2. Superficies de Referencia Geodésicos.....	8
Figura 3. Geometría de la latitud y longitud geodésica	11
Figura 4. Progresión del número de manchas solares en el ciclo solar.....	15
Figura 5. Estructura de la ionósfera en el día y la noche	17
Figura 6. Efecto de la ionósfera sobre las señales.....	22
Figura 7. Geometría básica entre VTEC y STEC en un modelo de capa simple.....	26
Figura 8. Modelo del retraso ionosférico	28
Figura 9. Ubicación del IPP al atravesar la ionósfera de capa simple	29
Figura 10.- Consideraciones del modelo de Klobuchar	30
Figura 11.- Identificación de satélites	32
Figura 12. Parámetros algoritmo de Klobuchar	33
Figura 13. Ejemplo de una serie temporal con tendencia lineal	41
Figura 14. Grafica de valores de periodograma para cada frecuencia analizada	48
Figura 15. Proceso de descarga de efemérides precisas.....	50
Figura 16. Orden jerárquico de las carpetas.....	52
Figura 17. Ejemplo de archivo de salida del script obs_sat.sh.....	53
Figura 18. Lista de satélites observados.....	54
Figura 19. Coeficientes ionosféricos.....	55
Figura 20. Coordenadas de satélites.....	56
Figura 21. Unión de coordenadas de satélites.....	57
Figura 22. Ejemplo de la base de datos de la estación GYEC	59
Figura 23. Serie temporal. Estación PTEC. Tiempo 00:00 horas.....	60
Figura 24. Serie temporal. Estación LJEC. Tiempo 00:00 horas.....	61
Figura 25. Mapa Regional de VTEC.....	62
Figura 26. Serie temporal del año 2013. Estación GYEC.....	63
Figura 27. Estación LJEC. Enero 2010.....	63
Figura 28. Serie no estacionaria. Tiempo 20:00 horas.....	69
Figura 29. Serie estacionaria. Tiempo 09:00 horas.....	69
Figura 30. Periodos fundamentales obtenidos de la serie temporal LJEC. Tiempo: 00:00 horas	70
Figura 31. Periodograma completo de la estación LJEC. Tiempo: 20:00 horas.....	71
Figura 32. Periodograma. Estación LJEC. Tiempo: 20:00 horas.....	72
Figura 33. Región crítica para la Hipótesis alternativa $\sigma_{ct2} < \sigma_{st2}$	78
Figura 34. Gráfica del modelo matemático con tendencia.....	81
Figura 35. Gráfica del modelo matemático sin tendencia.....	81
Figura 36. Gráfica del modelo matemático sin tendencia. Enero 2010	82
Figura 37. Modelo interpolado del mes de Enero 2010.....	82
Figura 38. Modelo extrapolado del mes de Enero 2010	85

RESUMEN

El presente trabajo se fundamenta en el estudio de la variabilidad temporal de la ionósfera para las estaciones REGME del Ecuador Continental cuyo parámetro de análisis es el contenido total de electrones (TEC). Estudios previos han analizado esta variable de forma global y regional con métodos de interpolación, sin embargo los resultados obtenidos difieren de la realidad puntual en cada estación. El objetivo de este trabajo es analizar las series temporales de TEC por horas entre los años 2010 y 2014 con datos GNSS para obtener modelos matemáticos no lineales que reflejen el comportamiento de esta variable, para ello se aplicó el algoritmo de Klobuchar que indirectamente permite obtener el TEC a través de la estimación del retardo ionosférico. Las estaciones procesadas fueron: GYEC, LJEC, PTEC y CUEC; pero, el estudio se profundizó en la estación LJEC que poseía menor carencia de datos, se estudiaron diferentes componentes como: tendencia, estacionaridad y estacionalidad, para lo cual se usó regresiones lineales y periodogramas, del total de las 24 series el 79,2% presentó una tendencia positiva siendo series no estacionarias y el 20,8% fueron series sin tendencia o estacionarias, del análisis de estacionalidad se obtuvo que los periodos fundamentales para el ajuste de los modelos matemáticos fueron de 2,5 y 0,7 años. Por lo tanto, se concluyó que de 00:00 a 04:00 horas y 10:00 hasta las 23:00 el TEC es más susceptible a la evolución del ciclo solar número 24 que para el año 2013 obtuvo su máximo solar mientras que el comportamiento ionosférico se repite cada 2,5 y 0,7 años.

PALABRAS CLAVE:

- **CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES**
- **KLOBUCHAR**
- **TENDENCIA**
- **ESTACIONALIDAD**
- **PERIODOGRAMA**

ABSTRACT

The present work is based on the study of the temporal variability of the ionosphere for the REGME stations of the Continental Ecuador whose parameter of analysis is the total electron content (TEC). Previous studies have analyzed this variable globally and regionally with interpolation methods, however the results obtained differ from the point reality in each season. The objective of this work is to analyze the TEC time series for hours between 2010 and 2014 with GNSS data to obtain nonlinear mathematical models that reflect the behavior of this variable. For this, the Klobuchar algorithm was used to get indirectly the TEC through the estimation of ionospheric delay. The stations processed were: GYEC, LJEC, PTEC and CUEC; but the study was deepened in the LJEC station that had more data, different components were studied, such as: trend, stationarity and seasonality, for which linear regressions and periodograms were used, of the total of the 24 series, 79,2% presented a positive trend being non-stationary series and 20,8% were series without trend or stationary, from the analysis of seasonality was obtained that the fundamental periods for the adjustment of the mathematical models were 2,5 and 0,7 years. Therefore, it was concluded that from 00:00 to 04:00 hours and 10:00 to 23:00 the TEC is more susceptible to the evolution of the solar cycle number 24 that for the year 2013 obtained its maximum solar while the Ionospheric behavior is repeated every 2,5 and 0,7 years.

KEY WORDS:

- **TOTAL ELECTRON CONTENT**
- **KLOBUCHAR**
- **TREND**
- **SEASONALITY**
- **PERIODOGRAM**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

La ionósfera es una de las capas de la atmósfera que se ve afectada por la incidencia del sol, el efecto que esta produce es la ruptura de los átomos en iones, por tal razón al ser un plasma no homogéneo situado en el campo magnético de la Tierra la ionósfera ejerce numerosas alteraciones sobre las ondas electromagnéticas que la atraviesan. Los principales efectos ionosféricos en las señales de radio son: retardo y adelanto de la señal llegando a la unidad del metro, centelleo ionosférico, entre otras.

Un parámetro de gran interés para conocer el comportamiento de la ionósfera es el Contenido Total de Electrones (TEC), por sus siglas en inglés Total Electron Content, que es definido como el número total de electrones libres presentes en la columna de sección que se extiende desde una estación receptora ubicado en la Tierra hasta un satélite considerado, por lo general, a este se lo conoce como STEC (Slant Total Electron Content) que es el rayo que se forma entre la estación con el satélite y a través de la aplicación de la función de mapeo usando ángulo cenital entre el satélite y el receptor se puede calcular el VTEC (Vertical Total Electron Content) donde la dirección de la señal apunta al centro de la Tierra.

La función de mapeo se aplica según el modelo de estimación de TEC. Esto supone que todos los electrones libres se concentran en una capa de espesor infinitesimal situado a una altura determinada (Fonseca, 2011). Los efectos de la ionósfera son directamente proporcionales a la cantidad de TEC (Ezquer, 2008) que pueden llegar a causar errores mayores al metro en el caso de uso de receptores de una sola frecuencia.

A nivel científico se han realizado varios estudios con respecto al cálculo de TEC a nivel mundial y local, en Malasia en el año 2008 se realizó una investigación acerca de la predicción de TEC en la ionósfera sobre la Región Ecuatorial en base al contenido total de electrones a través de dos métodos, el primero con doble frecuencia por medio del software Matlab y con la técnica PPP (Precise Point Positioning) a través del Software Científico Bernese 5.0 dando como resultados una variación similar en los dos métodos, los valores de TEC comienzan a aumentar gradualmente desde la mañana, llegan a su punto máximo al medio día y disminuyen alrededor de la tarde (Ya'acob & Abdurall, 2008).

En el Ecuador, los estudios que se han realizado corresponden a tesis de pregrado de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE que se han enfocado en varios aspectos sobre el contenido total de electrones. El primer análisis que se realizó fue la determinación del contenido total de electrones vertical para uso en posicionamiento con receptores GPS de una frecuencia obteniendo como resultado que el TEC tiene su mayor influencia desde las 03:00 a 07:00 horas y la menor influencia desde las 12:00 a 16:00 horas (Recalde, 2012), tiempo después se analizó la correlación del TEC con eventos sismológicos obteniendo como resultado que no existe una relación entre estas dos variables (Guano, 2015) y, por último, existe un estudio realizado sobre la influencia de la actividad ionosférica en el posicionamiento relativo en receptores de una frecuencia (L1) usando medidas de fase de las portadoras obteniendo como resultados mapas del contenido total de electrones en dos días del año 2013 (Vaca, 2015).

Al encontrarse el Ecuador cerca de la línea equinoccial tiene un alto grado de exposición solar que interactúa directamente con la ionósfera, cuanto mayor es el bombardeo de radiación solar a la Tierra mayor es el contenido de electrones que se puede encontrar provocando el retraso de la señal de GPS a los receptores (Labraña, Kollner, 2010). Una forma efectiva para determinar VTEC es a través de los datos GNSS obtenidos por la captación permanente de información en las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador, información que debe ser depurada para la detección de errores mediante un control de calidad de mediciones geodésicas satelitales del Ecuador.

De acuerdo con la metodología a aplicarse para determinar VTEC se podría utilizar la información que se encuentra en los archivos RINEX de observación y navegación como el número de satélites observados en un determinado tiempo y los coeficientes ionosféricos. Para este proyecto se aplicará el Algoritmo de Klobuchar, desarrollado en 1986, que calculará el VTEC de manera puntual en cada estación de monitoreo del Ecuador que tenga suficientes datos para obtener series temporales entre los años 2010 y 2014 y así determinar el comportamiento de la ionósfera a lo largo del año y durante las veinticuatro horas del día.

1.2 Definición de problema

El principal inconveniente que tienen las estaciones REGME del país es que no cuentan con una información puntual por cada estación sobre el comportamiento ionosférico debido a que solo se han realizado estudios en forma global o regional y no solo usando los datos que proporcionan las estaciones nacionales, sino con información adicional de estaciones IGS en América como: Bogotá, Colombia (BOGT); Brasilia, Brasil (BRAZ); Cali, Colombia (CALL); Washington, Estados Unidos (USNO) (Guano, 2015). Los análisis que se han realizado han sido en base a la aplicación de softwares científicos como Bernese obteniendo datos de TECu en una grilla determinada para posteriormente ser interpolarlos mediante técnicas geoestadísticas en softwares GIS y mapearlos, de tal forma que se ha logrado obtener una apreciación muy general de esta variable, la cual difiere a la realidad de cada estación.

1.3 Justificación

La ionósfera dentro de las áreas de América Central y en una parte de América del Sur posee un comportamiento complejo debido a que existe una distribución de electrones libres en la atmósfera que está directamente relacionada con la Anomalía Ecuatorial y la distorsión del campo magnético terrestre. La red SIRGAS de Operación Continua (SIRGAS-CON) proporciona una alta calidad de las

observaciones GNSS de doble frecuencia considerada como una fuente de información invaluable para hacer el monitoreo continuo de este fenómeno (SIRGAS, 2012). Sin embargo, dichos datos no han sido usados para el análisis puntual de la variabilidad ionosférica de cada estación GNSS en el Ecuador, por tal motivo es importante realizar el procesamiento de dicha información a través de la metodología propuesta por John Klobuchar. A diferencia de otros métodos como son las aplicaciones de softwares científicos que usan metodologías con armónicos esféricos y obtienen un valor promedio diario de VTEC, el algoritmo de Klobuchar permite determinar VTEC en cada estación de forma puntual y a cada hora del día.

En el país son escasos los estudios acerca de la variabilidad de la ionósfera, con este proyecto se comprenderá de forma específica cómo esta varía en el tiempo, es decir, si se mantiene constante o si tiene alguna tendencia. Al término del trabajo de investigación se espera obtener las series temporales de VTEC con sus respectivos análisis de tendencia, estacionaridad, estacionalidad y validarlos mediante la extrapolación con las funciones que se ajusten de mejor manera al comportamiento de cada serie y con el contraste de valores de VTEC que se encuentren fuera del período seleccionado.

El presente proyecto servirá de base para establecer una metodología con la cual se podrá desarrollar un modelo ionosférico para cada estación GNSS en el Ecuador una vez que exista gran abundancia de datos que sean como mínimo de 11 años consecutivos que representan la duración promedio de un ciclo solar. De tal manera, este proyecto aportará significativamente a la investigación espacial del Ecuador.

1.4 Descripción del área de estudio

Ecuador es un país situado en América del Sur, que limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico con una extensión de 283.561 km², incluido el archipiélago de Galápagos. Ecuador posee un Red GNSS de Monitoreo Continuo (REGME) que está instalada y administrada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), con una densidad actual de 44 estaciones cuya distribución y cobertura brinda un servicio a nivel nacional.

Gracias al apoyo de diversas instituciones públicas y privadas (Nacionales e Internacionales) se ha hecho posible dicha densificación e instalación desde el año 2008. La red proporciona información necesaria para el procesamiento diferencial de información GNSS, sin necesidad de salir al campo para la colocación de bases GPS que muchas veces generan problemas de logística y accesibilidad a los puntos; así como aumento del presupuesto (IGM Ecuador, 2015).

Las estaciones que serán tomadas en cuenta para el desarrollo del presente proyecto son las que posean gran abundancia de datos durante el periodo comprendido entre los años 2010 al 2014, además de que estas se encuentran ubicadas en el territorio continental como se muestra en la figura 1.

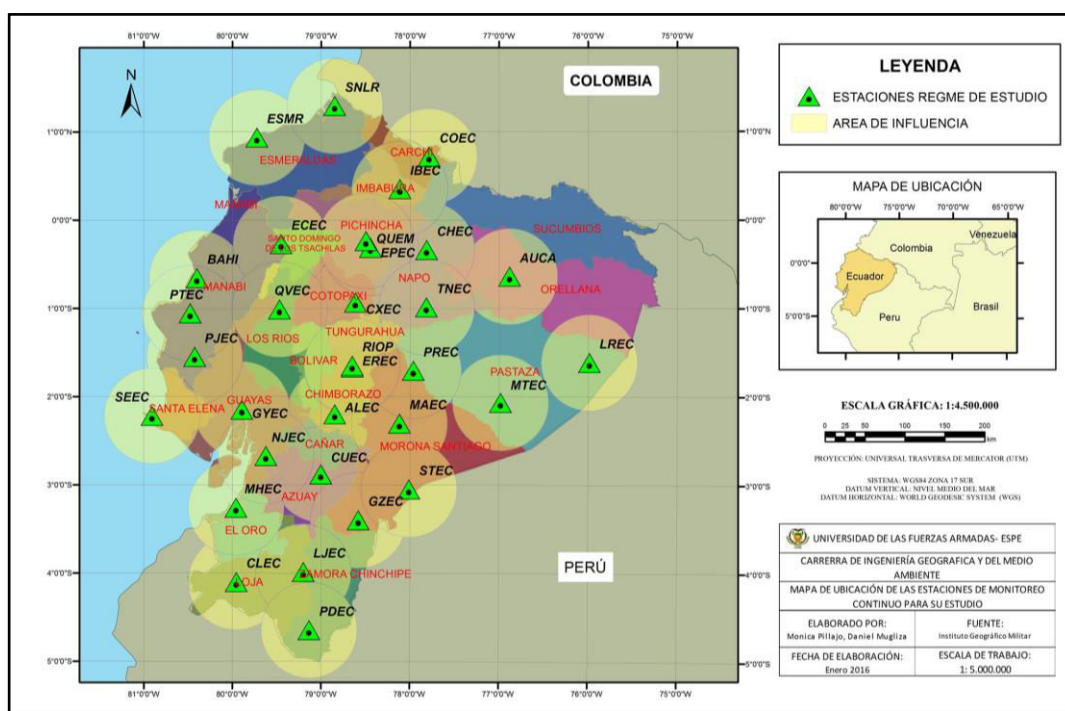


Figura 1. Ubicación de las estaciones GNSS de monitoreo continuo

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Analizar las series temporales de VTEC (Contenido Total de Electrones Vertical) por horas con técnicas estadísticas para determinar modelos matemáticos no lineales de las estaciones REGME del territorio continental ecuatoriano desde el año 2010 al 2014 y validarlos a través de un análisis de predicción.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Obtener los valores de TEC mediante el algoritmo de Klobuchar para generar series temporales de las veinticuatro horas del día de las estaciones GNSS.
- Determinar tendencia, estacionaridad y estacionalidad de las series temporales de TEC con técnicas estadísticas para obtener modelos matemáticos no lineales de cada serie.
- Validar el comportamiento de cada una de las series obtenidas mediante la extrapolación de los modelos matemáticos no lineales generados y compararlos con valores de TEC obtenidos en un período diferente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 SUPERFICIES DE REFERENCIA

Actualmente, las mediciones geodésicas se apoyan en tres “superficies de referencia” las cuales son: la superficie topográfica, geoide y elipsoide. La superficie topográfica es la que envuelve a la parte sólida de la Tierra que es irregular y carece de definición geométrica, es representada comúnmente por curvas de nivel y es sobre la cual ocurren los diferentes fenómenos geográficos. Por otro lado, al geoide se lo conoce como la superficie de nivel equipotencial del campo de gravedad terrestre el cual se encuentra establecido por la superficie del nivel medio del mar en estado libre de perturbaciones de marea y sirve de referencia para las mediciones de altura (Instituto Geográfico Nacional, 2010). En cuanto al elipsoide, es una elipse de revolución teórica la cual representa con gran aproximación a la superficie de la Tierra. La figura 2, muestra estas tres superficies de referencia, donde el geoide se encuentra representado por una malla cuadrangular entre el elipsoide y el terreno, para este ejemplo el elipsoide se encuentra por debajo del geoide, sin embargo no siempre sucede esto. A través del tiempo se han establecido diferentes elipsoides de referencia tales como: GRS80 y WGS84, que han sido adaptados a nivel global y referidos al centro de masa de la Tierra (geocentro) variando entre sí en los valores de los diferentes parámetros geométricos que definen el elipsoide.

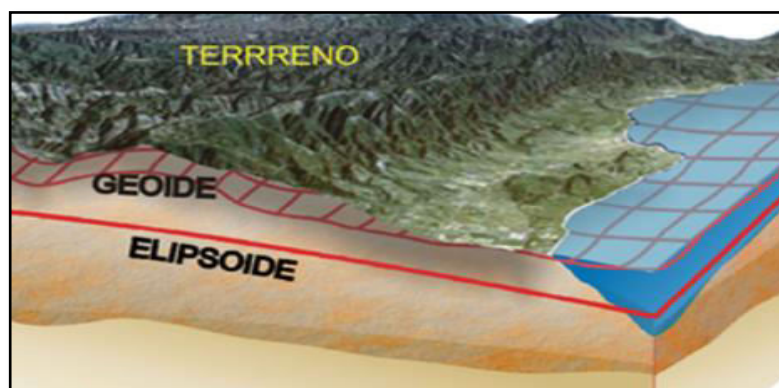


Figura 2. Superficies de Referencia Geodésicos

Fuente: (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2011)

Sobre el elipsoide de referencia se definen los diferentes tipos de coordenadas para la ubicación exacta de un punto en particular además de ser de gran importancia y apoyo para los diferentes sistemas satelitales de navegación global o por sus siglas en inglés GNSS (*Global Navigation Satellite System*), los cuales envían datos generalmente de ubicación referidos a un elipsoide específico de referencia. Esta superficie matemática también es utilizada en diferentes aplicaciones técnicas de medición como es la topografía, la geodesia y la cartografía. En la ecuación (2.1) se muestra la fórmula general del elipsoide.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.1)$$

Donde:

x, y : Son variables

a : Valor del semieje mayor del elipsoide

b : Valor del semieje menor

Estos valores dependerán del elipsoide de referencia que se aplique.

2.1.1 Sistemas y marcos de referencia

Un marco de referencia proporciona un conjunto de coordenadas de puntos situados en la superficie terrestre los cuales pueden ser usados para comprender el constante cambio que sufre el planeta como son: movimientos de placas tectónicas, hundimientos o carga regional, además de ser usado para la representación del planeta al medir su rotación en el espacio. Dicha rotación se mide con respecto a un marco que está sujeto a objetos estelares, llamado marco de referencia celeste. En el año de 1988 fue creado el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) para establecer y mantener un marco de referencia celeste, el ICRF (International Celestial Reference Frame), y un marco de referencia terrestre, el ITRF (International Terrestrial Reference Frame), juntos definen los parámetros de orientación de la tierra (EOPs).

Los marcos proporcionan una referencia común para comparar observaciones y resultados en diferentes sitios. Las principales técnicas geodésicas que utiliza el ITRF para calcular coordenadas precisas son: GPS, VLBI, SLR y DORIS. Dado que a medida los instrumentos y técnicas han ido evolucionando y el período de datos aumenta con el tiempo, el ITRF se actualiza constantemente (International Terrestrial Reference Frame, 2016). Existen varias versiones de ITRF siendo el más actual el ITRF2014, que está referido a la época 2010.0 cuyas especificaciones técnicas están disponibles en la siguiente página web (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/psd.php). Todas estas realizaciones incluyen posiciones de estación y velocidades además de suministrar los diferentes parámetros de transformación entre épocas.

El ITRS (International Terrestrial Reference System) constituye un conjunto de prescripciones y convenciones junto con los modelos necesarios para definir el origen, la escala, la orientación y la evolución temporal de un Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS). (IERS, 2013).

2.1.2 Coordenadas Cartesianas Rectangulares

Este sistema es el más usado debido a varias características prácticas como el cálculo de distancias y orientación que lo hace mucho más sencillo, generalmente se usa este tipo de coordenadas para aplicaciones como catastro, artillería, planeación urbana, entre otros (INEGI, 2006), este sistema está referido al centro de masas de la Tierra. El eje Z está ubicado en dirección al eje de rotación de la Tierra, el eje X en el plano ecuatorial y en dirección al meridiano origen (meridiano de Greenwich) y en dirección ortogonal derecho a este se encuentra el eje Y.

2.1.3 Coordenadas geodésicas

Un sistema de coordenadas geodésicas expresa toda ubicación en la Tierra en base a dos de las tres coordenadas de un sistema curvilíneo, los cuales están alineados en torno a los ejes de rotación de la superficie matemática de mayor aproximación a la Tierra, conocida como elipsoide. La ubicación de algún punto en la superficie topográfica está definida por latitud, longitud geodésica y altura elipsoidal. El ángulo diedro entre el plano de la sección del primer vertical (N) al elipsoide en el punto de observación y el plano ecuatorial es llamado latitud geodésica (ϕ) y el ángulo diedro en sentido antihorario entre el plano del meridiano de Greenwich y el plano meridiano del punto de observación es llamado longitud geodésica (λ). Adicional a esto debido a que el punto no se encuentra en la superficie de referencia, es decir en el elipsoide, sino en la superficie topográfica se establece un desnivel conocido como altura elipsoidal (h). La figura 3, muestra de manera visual la ubicación de un punto en la superficie terrestre tomando en cuenta la geometría del elipsoide.

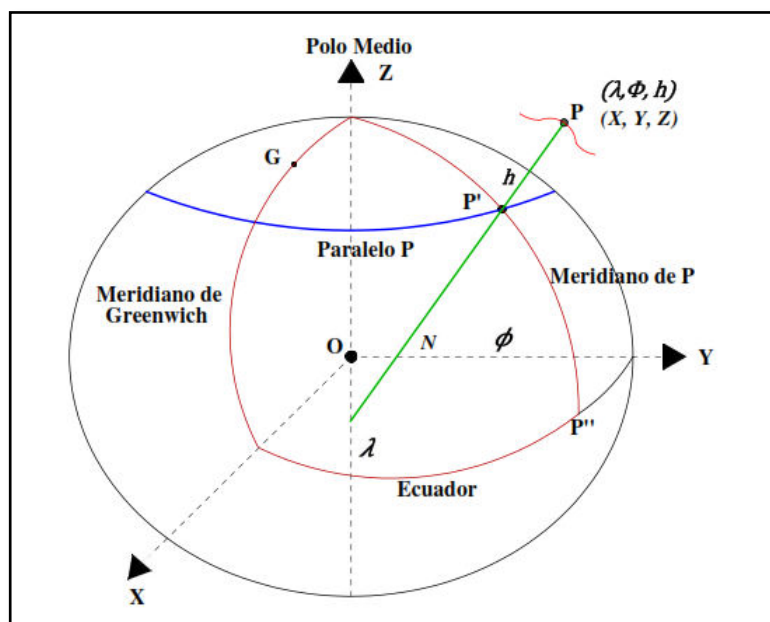


Figura 3. Geometría de la latitud y longitud geodésica

Fuente: Adaptado de (Herrero, 2014)

2.1.4 Relación entre sistemas de coordenadas

Debido al diferente uso y aplicación que se requiera, existe una relación directa para la transformación de coordenadas geodésicas a coordenadas cartesianas o viceversa, a continuación, se muestran dichas relaciones desde la ecuación (2.2) hasta la (2.9) (Zakatov, 1981).

Transformación de coordenadas geodésicas a cartesianas:

$$(\phi, \lambda, h) \rightarrow (X, Y, Z)$$

$$X = (N - h) \cos \phi \cos \lambda \quad (2.2)$$

$$Y = (N - h) \sin \phi \sin \lambda \quad (2.3)$$

$$Z = [(1 - e_1^2)N + h] \sin \phi \quad (2.4)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 \phi}} \quad (2.5)$$

Transformación de coordenadas cartesianas a geodésicas:

$$(X, Y, Z) \rightarrow (\phi, \lambda, h)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{Z + e_2^2 b \sin^3 \theta}{\sqrt{(X^2 + Y^2) - e_1^2 a \cos^3 \theta}} \right) \quad (2.6)$$

$$\theta = \frac{a Z}{b \sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \arctan \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (2.8)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \phi} - N \quad (2.9)$$

Donde:

ϕ : Latitud geodésica

e_1^2 : Primera excentricidad del elipsoide elevada al cuadrado

λ : Longitud geodésica

e_2^2 : Segunda excentricidad del elipsoide elevada al cuadrado

h : Altura elipsoidal

N : Radio de la sección del primer vertical

a : Semieje mayor del elipsoide

b : Semieje menor del elipsoide

2.2 IONÓSFERA

2.2.1 Introducción

La atmósfera terrestre está compuesta por varias capas que poseen diferentes características físicas y químicas a medida que se alejan verticalmente de la superficie terrestre, existe una en particular que es de primordial estudio en la transmisión de señales desde los satélites hasta los receptores en la Tierra, dicha capa es la ionósfera que se encuentra localizada aproximadamente desde los 60 km hasta los 400 km de altura. Es una capa atmosférica que mantiene una relación estrecha con la emisión constante de ciertos rayos de energía enviados desde el espacio siendo los principales: los rayos ultravioletas, rayos X provenientes del sol y la alta energía cósmica. La ionósfera está caracterizada por tener una gran concentración de electrones libres así como átomos y moléculas positivas llamadas iones (De Oliveria, Galera, & Damasceno, 2000) que pueden alterar la transmisión de señales en el rango de 2-30 MHz.

A principios del siglo XIX se tuvo indicios de una capa electrificada dentro de la atmósfera gracias al experimento de Marconi que en 1901 logró transmitir las primeras ondas al espacio, los años siguientes se realizaron más estudios hasta que por el año de 1930 se introdujo a la ciencia el término ionósfera. Gracias a las investigaciones realizadas a lo largo del tiempo se ha podido determinar su estructura vertical, sus variaciones espaciales y temporales y todos los procesos físicos que influyen en su comportamiento (Hunsucker & Hargreaves, 2002).

Los procesos químicos que suceden en la ionósfera son dos: la ionización de las partículas y el proceso de recombinación química. La ionización se produce cuando los rayos del sol emiten fotones, que son paquetes de alta energía y al encontrar partículas en su medio dan suficiente energía para separar a las moléculas o átomos en iones provocando que esta capa quede ionizada, es decir que queden iones libres en el medio. Los principales gases atmosféricos que se ionizan son: N_2 , O_2 y O. Este proceso de ionización se contrarresta con la recombinación química que ocurre

cuando un electrón libre se mueve muy cerca de un ion positivo y es atraído hacia él formando nuevos elementos. La recombinación química es notoria en altitudes bajas. El balance entre ionización y recombinación determina el grado de ionización de las capas, sin embargo, a pesar de buscar un equilibrio en la capa con estos dos procesos no es suficiente para evitar los efectos de la ionósfera sobre la trayectoria de la señal emitidos por el satélite (Mohamad Mahdi, 2013).

2.2.2 Influencia de elementos externos

La influencia de los elementos externos a la atmósfera de la Tierra es fundamental al momento de estudiar la ionósfera porque el espacio emite diferentes tipos de rayos que alteran a los electrones en esta capa, los más importantes son los emitidos por el sol y los rayos cósmicos. El sol es el principal elemento del sistema solar que tiene mucha influencia sobre la Tierra, en especial sobre el comportamiento de la ionósfera que afecta las señales de comunicación.

El sol es una estrella gigante compuesta por un 90% de hidrógeno y un 10% de helio, la producción de energía se debe a una continua transformación de la fusión nuclear del hidrógeno y helio dentro del núcleo del sol (Zolesi & Cander, 2014). La constante de energía que emite el sol cada año es de 1370 W/m^2 . El fenómeno más importante que tiene una influencia global son las manchas solares que describen el comportamiento de la actividad solar respecto de su campo magnético, por lo general cuando existe la presencia de una mancha solar el campo magnético es fuerte y tiende a verse oscuro debido a que es una zona con menor temperatura en comparación con el resto de la estrella. Para estudiar este comportamiento se usa el concepto de ciclo solar que tiene una duración aproximada de once años, las manchas solares indican un máximo solar y es cuando el sol tiene mucha actividad. El estudio de estas manchas solares se ha dado desde 1610 hasta la actualidad y se ha podido establecer que su comportamiento es periódico (Pisacane, 2010). La figura 4, muestra el final del ciclo solar 23 y el recorrido del ciclo solar 24 que inicio en el año

2009 y según su predicción continuará hasta el 2020, alcanzando su máximo solar entre los años 2013 y 2014.

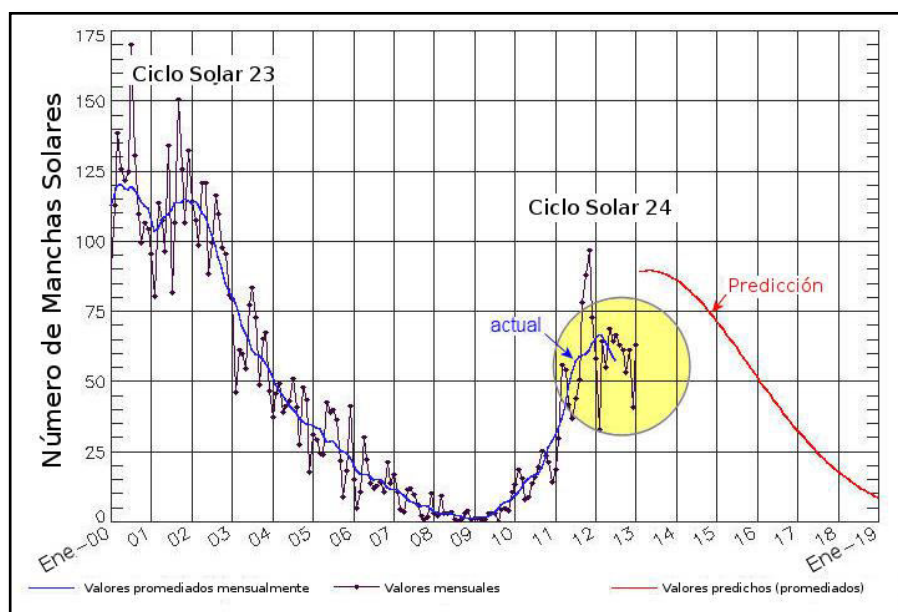


Figura 4. Progresión del número de manchas solares en el ciclo solar

Fuente: (Ciencias Beta. NASA, 2013)

Otro elemento de influencia externa que se debe considerar son los rayos cósmicos que en un 89% son protones y lo restante son partículas alpha. Estos rayos cósmicos son muy energéticos y provienen del espacio ya sea energía de otras estrellas o galaxias, viajan a velocidades próximas al de la luz y llegan en todas las direcciones de forma aleatoria por lo que resulta difícil determinar su origen (Marcote, 2011), al toparse con el campo magnético de la Tierra un porcentaje de ellas no puede ingresar a la atmósfera; pero, las que ingresan alteran a las capas bajas de la ionósfera.

2.2.3 Regiones y capas ionosféricas

Al ser la ionósfera una capa importante de la atmósfera se ha realizado a lo largo del tiempo una variedad de estudios para entender su comportamiento, uno de los primeros instrumentos para realizar su estudio fueron las ionosondas que son instrumentos que dan información virtual sobre alturas y estimaciones de la densidad de electrones de la parte inferior de la ionósfera (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network, 2014). Las regiones de la ionósfera se clasifican acorde con la densidad de moléculas para ser ionizadas en función de la intensidad de radiación de rayos X y UV, dichas capas se denominan: D, E y F, cabe recalcar que la última región se subdivide en dos: F1 y F2 cada una con características diferentes.

En 1931, Sydney Chapman presentó un modelo matemático para expresar la formación de las capas ionizadas y su comportamiento a lo largo del día, su teoría se basa en cuatro supuestos: primero que la atmósfera está formada por un solo tipo de partículas distribuidas a una altura constante, segundo no hay variaciones en el plano horizontal, tercero la radiación es absorbida en proporción con la concentración de gases en el medio y, por último, el coeficiente de absorción es constante (Hunsucker & Hargreaves, 2002). Este modelo matemático es importante porque a pesar de que se basa en una ionósfera teórica sirve como referencia confiable para los fundamentos del modelado de la misma.

Cada una de las regiones en las que se clasifica la ionósfera poseen características específicas de este modo, la región D y F1 tienden a desaparecer en la noche, la región E se encuentra siempre presente aunque en la noche es mucho más débil que en la mañana y la región F2 tiende a ser persistente, pero con reducida intensidad. Estas capas fueron clasificadas en base a la longitud de onda de la radiación solar que absorben o, dicho de otro modo, el nivel de radiación que se necesita para desasociar las moléculas dentro de cada región (Mohamad Mahdi, 2013). La figura 5, muestra las diferentes regiones de la ionósfera en su comportamiento diurno y nocturno

donde ciertas capas tienden a desaparecer en la noche como la F1 o persiste con menor densidad de electrones como la región E.

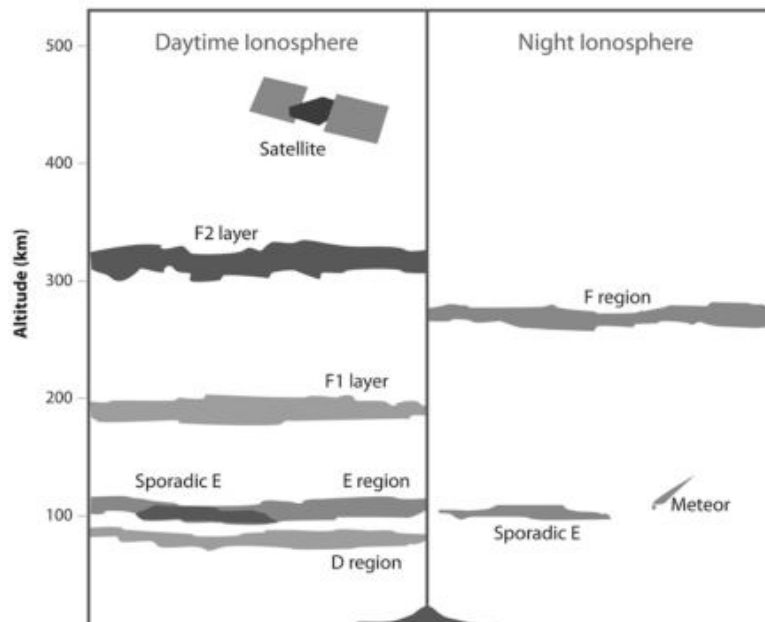


Figura 5. Estructura de la ionósfera en el día y la noche

Fuente: (Zolesi & Cander, 2014)

2.2.3.1 Región D

La región D es la capa más baja de la ionósfera y se localiza aproximadamente entre los 60 y 100 km de altitud sobre la superficie terrestre. Los componentes químicos que se pueden encontrar son: N_2 , O_2 , Ar, CO_2 , He y una gran cantidad de O_3 y H_2O . Los componentes ionizados y cargados positivamente son en su mayoría los NO^+ (óxido nítrico), mientras que el O_2^- se encuentra presente como cargas negativas (Zolesi & Cander, 2014). La concentración de electrones está alrededor de $10^8 - 10^{10}$ electrones/ m^3 en el día, mientras que por la noche se reduce a $10^1 - 10^2$ electrones/ m^3 . Los rayos que ionizan esta región son los UV (ultravioleta); pero, de manera particular los rayos cósmicos que se vuelven predominantes a una altura de 70 km. La región D es una zona con una química complicada, está bajo un fuerte

control solar y en las noches tiende a desaparecer, lo que la convierte en una zona con gran absorción de señales de radio que puede ser monitoreada.

Es la región que absorbe la parte más energética de la radiación solar, los principales rayos que influyen en esta zona son los rayos α -lyman que ionizan las moléculas de NO, los rayos ultravioletas que se encargan de ionizar los elementos de N_2 y O_2 , los rayos X que se relacionan fuertemente con la actividad solar y no son significantes cuando hay pocas manchas solares y, por último, los rayos cósmicos galácticos. La absorción de la señal depende de la densidad de electrones y de la frecuencia de colisiones entre electrones y partículas neutras (Hunsucker & Hargreaves, 2002).

2.2.3.2 Región E

La región E se encuentra localizada entre los 105 y 190 km de altura desde la superficie terrestre, es una capa que tiene la más baja absorción de la radiación solar. La ionización de la región E se da básicamente por los rayos X y los rayos ultravioletas produciendo: N_2 , O_2 y O y al ocurrir el proceso de recombinación se forman los elementos de NO^+ y O_2^+ . Por lo general, esta capa en horas de escasa luz solar no desaparece, pero se torna débil, aproximadamente contiene 1×10^{11} electrones/ m^3 en el día y por la noche se reduce a 5×10^9 electrones/ m^3 . Esta capa tiene un comportamiento muy similar al modelo matemático de Chapman. Además, presenta una anomalía remarcable denominada Región esporádica E que es un fenómeno independiente de la región normal E debido a que posee una distribución espacial muy diversa, puede aparecer en cualquier momento del día y la noche o puede ampliarse o limitarse a una sola área (Zolesi & Cander, 2014).

2.2.3.3 Región F

La región F se localiza entre los 160 a 350 km de altura desde la superficie terrestre, es la capa más alta de la ionósfera y por su comportamiento se encuentra fragmentada en dos subcapas denominadas F1 y F2 con características diferentes cada una. Es una región muy importante desde el punto de vista de la comunicación por radio y de los sistemas de navegación (Zolesi & Cander, 2014). Los rayos que absorbe esta capa son los ultravioletas provenientes del sol. La región F1 cubre aproximada una distancia vertical de 140 a 210 km, esta capa junto con la región E pueden contribuir en un 10% en el tiempo de retraso ionosférico de la señal de GPS (Klobuchar, 1995). La concentración de electrones que puede contener durante el día es entre $10^{11} - 10^{12}$ electrones/m³ y es una capa que no siempre aparece.

Los principales componentes ionizados son NO^+ y O_2^+ seguidos de O^+ y N^+ . Los rayos ultravioleta son los encargados de ionizar esta capa, la altura de esta región depende de varios factores como la actividad solar, la estación y la actividad geomagnética. Por otro lado, está la capa F2 que se encuentra en una altura de 210 a 300 km de altura y siempre está presente, es una región densa y con más variabilidad causando los mayores efectos en las señales de GPS. La molécula predominante en esta capa es el O^+ seguido de H^+ y He^+ , tiene una densidad electrónica entre $10^{10} - 8 \times 10^{12}$ electrones/m³. La región F2 no tiene un comportamiento similar al modelo de Chapman, por lo general la densidad de electrones aumenta después de la salida del sol (Zolesi & Cander, 2014).

2.2.4 Propagación de señales electromagnéticas en la ionósfera

La propagación de una onda en el espacio está definida por su frecuencia y longitud de onda. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en el año de 1953 propuso una división del espectro radioeléctrico que es el medio por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio electromagnéticas que hacen posible la telecomunicación. La tabla 1, muestra la clasificación de las señales, donde la comunicación con satélites usa frecuencias VHF y UHF que son afectadas por la

ionósfera durante su transmisión del espacio a la Tierra. Las señales de GPS tienen dos frecuencias fundamentales L1 y L2 de 1575 GHz y 1227 GHz respectivamente.

Tabla 1.**Distribución convencional del espectro radioeléctrico**

Sigla	Denominación	Frecuencia	Uso típico
VLF	Very Low Frecuencias	10 KHz a 30 KHz	Enlaces de radio a gran distancia
LF	Low Frecuencias	30 KHz a 300 KHz	Enlaces de radio a gran distancia, ayuda a la navegación aérea y marítima.
MF	Medium Frecuencias	300 KHz a 3 MHz	Radiodifusión
HF	High Frecuencias	3 MHz a 30 MHz	Comunicaciones de todo tipo a media y larga distancia
VHF	Very High Frecuencias	30 MHz a 300 MHz	Enlaces de radio a corta distancia, televisión, frecuencia modulada
UHF	Ultra High Frecuencias	300 MHz a 3 GHz	Enlaces de radio, Ayuda a la navegación aérea, Radar, televisión
SHF	Super High Frecuencias	3 GHz a 30 GHz	Radar, enlaces de radio
EHF	Extra High Frecuencias	30 GHz a 300 GHz	Usado para la radioastronomía

Fuente: (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012)

Cuando las ondas de radio atraviesan la atmósfera pueden ser alteradas por diferentes fenómenos como la refracción, reflexión, dispersión, absorción, polarización, retraso en el tiempo de propagación y centelleo ionosférico que están en función del contenido total de electrones en la ionósfera que es un parámetro esencial para determinar la calidad de la misma (Ghasemi, 2012).

Una región ionizada puede afectar la señal en al menos dos formas, la primera es que la energía de la onda puede ser absorbida completa o parcialmente por las

partículas con carga como son los electrones y la segunda es que la dirección de la propagación de la señal puede alterarse a causa del efecto de los electrones libres y las partículas neutras presentes en las regiones ionosféricas. La colisión de electrones entre sí hace que estos pierdan energía, por lo tanto los electrones toman energía de las ondas de radio para buscar un punto de equilibrio provocando la atenuación de la señal. Como regla general, las ondas de radio sufren pérdida de energía y fuerza de la señal en las capas altas de ionósfera y las atenuaciones ocurren en las latitudes bajas de la misma, especialmente la región D (Dabas, 2000).

La forma inestable de la ionósfera hace que el poder de la señal y la propagación de la misma fluctúen o experimenten cambios cuando pasan a través de este medio, dicho fenómeno es conocido como el centelleo ionosférico que disturba a la comunicación satelital, a los sistemas de navegación global y a las observaciones radioastronómicas afectando la calidad de los datos.

En el planeta existen dos áreas específicas que se ven afectadas por este fenómeno, una a elevadas latitudes y otra centrada entre $\pm 20^\circ$ con respecto al ecuador magnético, en las latitudes medias el centelleo afecta básicamente a las señales en ondas métricas (Ruiz Gómez, Ruiz del Arbol, Maciá, & De la Morena, 2008). Por lo tanto, el efecto que causa la ionósfera sobre las señales electromagnéticas es muy relevante por el tipo de información que transmiten debido a esto se han realizado varios estudios y se han generado modelos que permiten corregir dichos efectos haciendo que la información emitida desde el espacio sea lo más real posible.

2.2.5 Retardo ionosférico

El retraso ionosférico es el tiempo de demora que una señal de GPS o cualquier otra sufre al cruzar la ionósfera desde el espacio, es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal y directamente proporcional al contenido total de electrones (TEC) (Hoque & Jakowski, 2014). El contenido total de electrones está en

función de muchas variables entre las cuales están: condiciones geomagnéticas, tiempo local, estación del año, localización geográfica, el ángulo de elevación de la estación respecto al satélite, el estado y la actividad solar. Según (Klobuchar, 1975) el TEC es más alto en las regiones donde existe pocas horas locales de luna y es mucho mayor en las zonas de $\pm 20^\circ$ que es considerada como la zona de anomalía ecuatorial producida por la ionósfera que es el lugar donde los usuarios de una sola frecuencia pueden encontrar los errores más altos. El error causado por la ionósfera es de 15 m en el día y 3 m en la noche aproximadamente (Bi, Tang, Wu, Cao, & Ma, 2012). La figura 6, muestra los efectos de la ionósfera sobre la señal transmitida desde el satélite a una estación terrestre GNSS, el color amarillo representa la densidad de electrones libres en la ionósfera y se nota claramente como la dirección de la señal se distorsiona al atravesar esta capa.

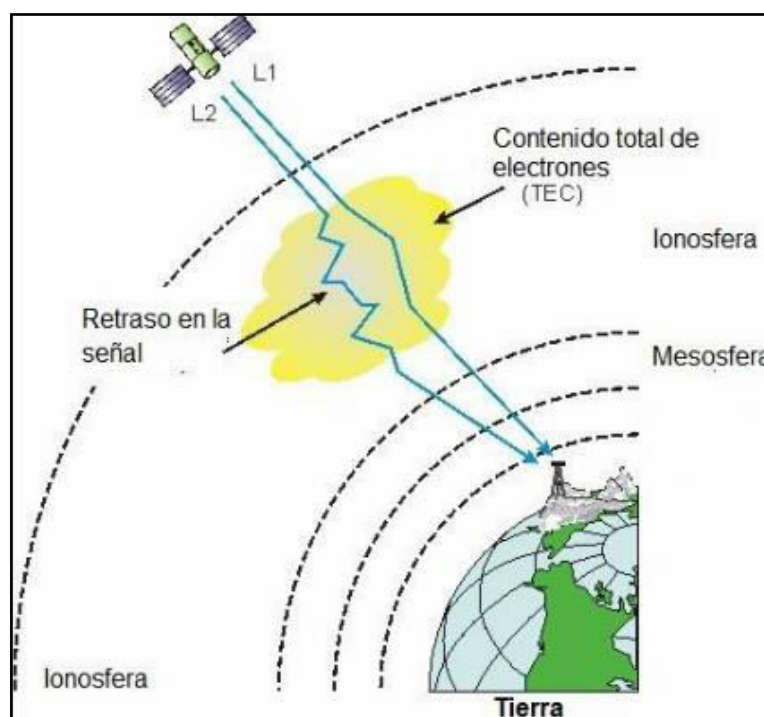


Figura 6. Efecto de la ionósfera sobre las señales

Fuente: (Díaz & Vásquez, 2015)

2.2.6 Modelos ionosféricos

La ionósfera es conocida como la mayor fuente de error en el sistema de navegación global por satélite con una sola frecuencia, por ello para mejorar este error se usan modelos ionosféricos a partir de datos obtenidos con receptores de doble frecuencia y generando modelos ionosféricos que corrijan el error producido por la capa. Cada sistema de navegación sea GPS, Galileo y GLONASS poseen su modelo para correcciones de retraso ionosféricos.

El sistema GPS dentro del archivo de navegación en estaciones de doble frecuencia transmite valores de 8 coeficientes ionosféricos diarios que son necesarios para aplicar el modelo de aproximación empírica propuesto por Klobuchar en 1986. Por otro lado, esta GLONASS que en su archivo de navegación no tiene parámetros para la corrección del efecto ionosférico por lo que los receptores de una sola frecuencia no pueden corregir dicho retraso, sin embargo, si el receptor incluye una unidad de recepción GPS, el retardo ionosférico en la señal GLONASS se puede corregir utilizando parámetros ionosféricas del archivo de navegación GPS (Hoque & Jakowski, 2014), mientras que Galileo corrige el efecto de la ionósfera con el Modelo NeQuick recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

El modelo de Klobuchar está enfocado hacia los usuarios de GPS con una sola frecuencia a modo que pueden tener la corrección de la señal debido al efecto de la ionósfera, fue desarrollado por John Klobuchar, dentro de la metodología del modelo no se toma en cuenta a todas las regiones de la ionósfera sino que considera una altitud promedio de 350 km desde la superficie de la Tierra. Este modelo provee una estimación diferente del retraso ionosférico para el día y la noche en segundos, a través del uso 8 coeficientes ionosféricos que son actualizados por el Segmento de Control de GPS de acuerdo con la estación y el nivel de actividad solar (Angrisano, et al., 2011). Además, solo permite el cálculo del VTEC (Vertical Total Electron Content) que es lo que le difiere del modelo NeQuick cuya metodología realiza el

cálculo del contenido total de electrones tanto vertical como oblicuo describiendo de esta manera la variación temporal y espacial de la densidad de electrones ionosféricos.

El modelo NeQuick utiliza los picos de las tres principales regiones de la ionósfera (E, F1, F2) como puntos de anclaje y es usado por el sistema de navegación Galileo como parte de un algoritmo base para la corrección en tiempo real de los efectos ionosféricos. El modelo Klobuchar usado por GPS provee el 50% en la reducción de errores mínimos cuadráticos de los usuarios de GPS con una sola frecuencia mientras que el modelo NeQuick corrige en un 70% el retraso ionosférico.

Sin embargo, se han realizado otros modelos que buscan el mismo fin de los mencionados anteriormente o que proporcionan información relevante de la ionósfera, por ejemplo, el modelo IRI (International Reference Ionosphere) que desde el año de 1969 es un modelo estándar reconocido internacionalmente para la especificación de los parámetros de plasma en la ionósfera, describe mensualmente la densidad de electrones promedio, la temperatura de iones y electrones. La última versión es el IRI-2012, la fuente de datos incluye la red mundial de ionosondas que está monitoreando la densidad de electrones ionosféricos por debajo de la capa F desde hace más de cincuenta años (Alizadeh, et al., 2013). También es importante recalcar los mapas de VTEC regional que pone a disposición de cualquier usuario la Universidad de La Plata de Argentina que usa una metodología de armónicos esféricos, presenta mapas a cada hora del día y a lo largo de todo el año.

De esta forma, todos los modelos proporcionados a nivel mundial buscan como fin una mejor comprensión de la ionósfera y, sobre todo, buscan corregir los efectos que causa sobre las señales electromagnéticas haciendo que la transmisión de la misma sea lo más real posible y que la información que lleva consigo no se distorsione por la atenuación o centelleo de la señal.

2.3 CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES

2.3.1 Concepto

El Contenido Total de Electrones (TEC) está definido como el número de electrones contenidos en una columna de un metro cuadrado de sección extendida desde el receptor hasta el satélite (Rodríguez-Bouza, Herraiz, Rodríguez, & Radicella, 2014), siendo matemáticamente la integral de contorno de la distribución de densidad de electrones, η , a lo largo de una trayectoria dada Γ de acuerdo a la ecuación (2.10). (Brunini, Camilion, & Azilicueta, 2011)

$$TEC = 10^{-16} \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} \eta * d\eta \quad (2.10)$$

Donde:

η : Densidad de electrones medido en electrón por metro cubico

Γ : Es la trayectoria en metros desde el satélite hasta el receptor

$d\eta$: Es el elemento diferencial de la densidad de electrones

El TEC es medido en unidades de Contenido Total de Electrones conocido como TECu ($1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ electrones/m}^2$), además el TEC puede variar de 1 a 180 TECu. La sensibilidad del intervalo de retraso ionosférico al TEC para señales L1 es de 162 mm/TECu , por lo tanto, el intervalo de retraso aproximado para esta señal puede alcanzar hasta 90 metros para un satélite con baja elevación (Brunini, Meza, & Bosch, 2005).

2.3.2 Tipos de TEC

La notación de TEC puede variar dependiendo de su trayectoria Γ , si es vertical será VTEC, y si Γ es inclinada será STEC (Brunini, Camilion, & Azilicuenta, 2011). Por lo general, la dirección de TEC es oblicua con respecto al ángulo cenital por lo que se adoptó una función de mapeo para poder calcular el factor de inclinación entre el STEC y VTEC (Zhong, Lei, Dou, & Yue, 2014). Esta relación está dada como:

$$sTEC = M(z') * vTEC \quad (2.11)$$

Donde M se la conoce como la función de mapeo y depende del ángulo cenital z que va en dirección a la línea de visión (LOS- Line of Sight) que atraviesa la ionósfera hacia el satélite GNSS. La figura 7, muestra la dirección que puede seguir los tipos de TEC además que indica la posición del ángulo cenital del cual depende la función de mapeo.

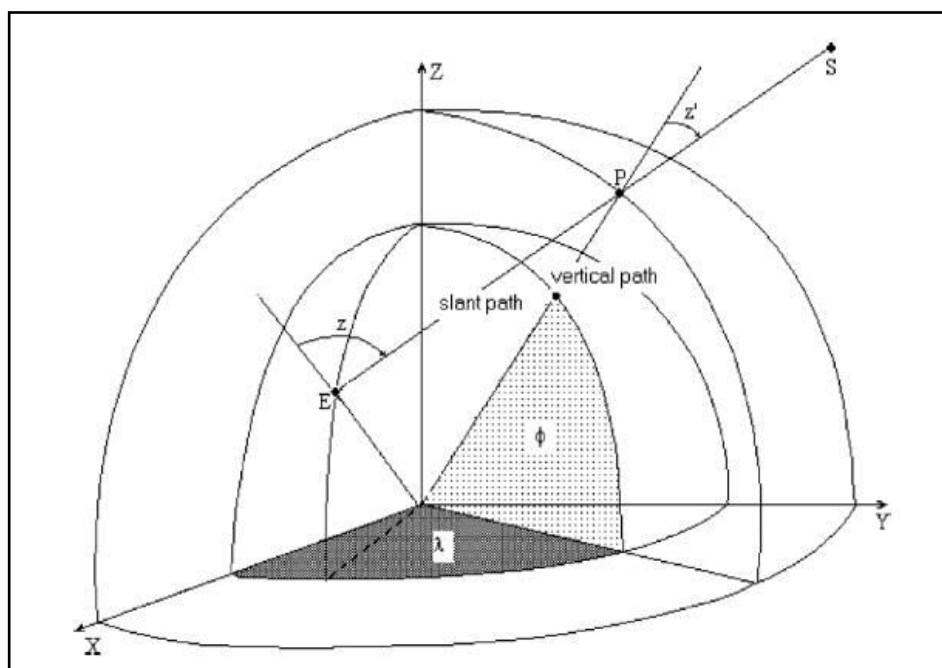


Figura 7. Geometría básica entre VTEC y STEC en un modelo de capa simple

Fuente: (Brunini C. , et al., 2004)

2.4 ALGORITMO DE KLOBUCHAR

Al conocer los efectos negativos de la ionósfera sobre las señales emitidas desde el espacio a la Tierra se ha buscado remediar dicho efecto, de tal forma que actualmente existen tres técnicas que pueden solucionar en forma parcial este problema, la primera es utilizando una técnica de posicionamiento con doble frecuencia, también se puede usar el sistema de aumentación basado en satélites y, por último, la utilización de modelos ionosféricos (Angrisano, et al., 2011).

El uso de la técnica de doble frecuencia suele ser el más efectivo ya que la corrección de la señal se obtiene mediante una combinación lineal entre las mediciones de falsas distancias de doble frecuencia, lo que hace que los datos captados por el receptor estén ya corregidos. El sistema de aumentación basado en satélites permite una corrección de las señales desde el satélite al receptor de la Tierra a través de una red de estaciones terrestres colocadas sobre una zona geográfica, la corrección se da tanto en la posición horizontal como vertical; pero, es una técnica compleja debido a que implica el uso de arquitecturas sofisticadas y receptores caros mientras que los modelos ionosféricos resultan ser más fáciles y baratos respecto a las dos técnicas antes mencionadas.

Por tal razón se han propuesto varios modelos matemáticos para corregir el retraso de la ionósfera, el más fácil en su metodología y aplicación es el desarrollado por John Klobuchar en 1986 que propuso un modelo empírico usado por el Sistema de Posicionamiento Global GPS para contrarrestar el efecto producido por la ionósfera y que es usado hasta la actualidad (Hoque & Jakowski, 2014).

2.4.1 Historia del modelo

Los Departamentos de Defensa y Transporte de los Estados Unidos junto con la NASA al principio de los 60 tenían interés en crear un sistema de navegación que

tuviera como fin conocer el posicionamiento geográfico de cualquier elemento sobre la Tierra. Hubo muchos intentos antes de que se conociera el Sistema de Posicionamiento Global GPS o NAVSTAR que en un principio manejaba señales de una sola frecuencia (1,575 GHz), sin embargo, los efectos de la ionósfera sobre esta frecuencia generaba un retraso de la señal de 300 ns que corresponden a 100 metros en distancia (Klobuchar, 1987), lo que llevó a buscar una alternativa para corregir dicho error, de esta forma aparece la señal de doble frecuencia (1,227 GHz) que tiene la característica de corregir el retraso de la señal mientras esta es captada por el receptor en la superficie terrestre.

El algoritmo de Klobuchar fue diseñado para aquellos usuarios de GPS que no pueden acceder a un equipo de doble frecuencia y que necesariamente deben realizar una corrección por efectos de la ionósfera, en especial si se encuentran en regiones de latitud media respecto al ecuador geomagnético correspondiente a las latitudes entre $\pm 20^\circ$. El modelo matemático se basa en ocho coeficientes ionosféricos que se transmiten en el mensaje de navegación y aproximadamente corrige el 50% del error ionosférico (Klobuchar, 1987)

2.4.2 Consideraciones

Cuando el modelo fue desarrollado no se contaba con un avance en la tecnología de las computadoras, por ejemplo no existía gran capacidad de almacenamiento en la memoria del CPU (Unidad Central de Proceso), por sus siglas en inglés Central Processing Unit, además de la ausencia de programas sofisticados para desarrollar un modelo demasiado complejo, por ello el algoritmo es sencillo y con una mínima complejidad computacional (Klobuchar, 1987). El algoritmo teóricamente está representado por el mejor ajuste de la función positiva del coseno a través de una curva de 14 horas en tiempo local y un valor constante denominado DC para la noche de 5 ns equivalentes a 9,24 TECu (Hoque & Jakowski, 2014), el valor de 14 horas puede variar según la región donde se efectuó el estudio de ionósfera. La figura 8, muestra una curva donde el ajuste es de 14 horas que van desde las 05:00 hasta las 21:00 horas, mientras que el valor constante DC va desde las 21:00 hasta las 05:00

horas, la línea negra muestra el ajuste del algoritmo mientras que la línea roja modela las observaciones del retraso de la ionósfera. La amplitud y el periodo de la curva están en función de una ecuación polinómica de tercer grado que depende de la latitud geomagnética.

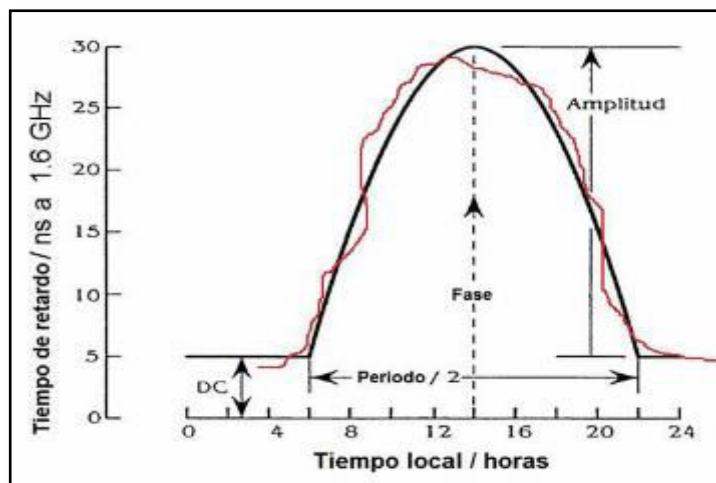


Figura 8. Modelo del retraso ionosférico

Fuente: (Díaz & Vásquez, 2015)

El valor de TEC que se obtiene es en el punto donde la dirección de la señal emitida desde el satélite interseca con la ionósfera denominado IPP (Ionosphere Pierce Point), es un punto que se ve afectado por las estaciones del año, el campo geomagnético y está directamente relacionado con la actividad solar (Lee & Park, 2011). Además, en el modelo se asume que la ionósfera es una capa simple, es decir no fragmentada en regiones, que tiene una altura constante de 350 km desde la superficie terrestre. La figura 9, muestra la ubicación del IPP dentro del modelo de ionosfera de capa simple además de la altura de la capa desde la superficie terrestre.

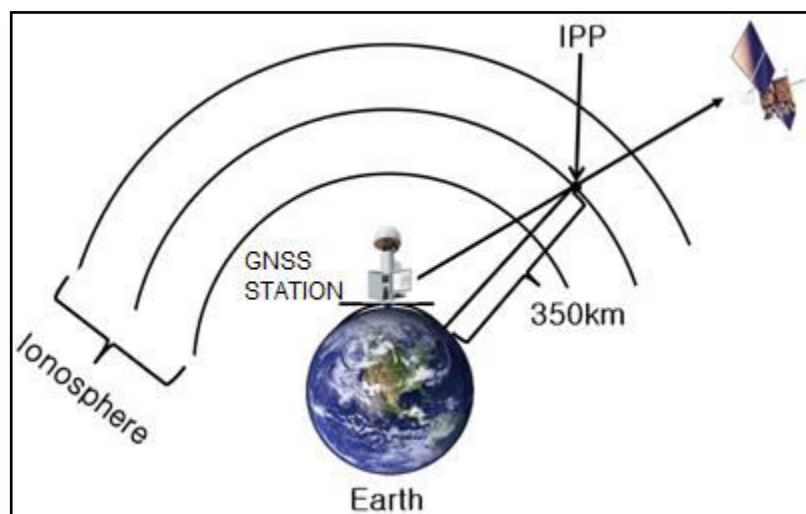


Figura 9. Ubicación del IPP al atravesar la ionósfera de capa simple

Fuente: (Lee & Park, 2011)

El cálculo de TEC necesariamente se debe realizar en coordenadas geomagnéticas y no geodésicas; pero, el algoritmo se enfoca en latitudes medias comprendidas entre $\pm 75^\circ$ donde el modelo es eficiente como se aprecia en la figura 9. Además, los resultados que arroja el algoritmo indirectamente son del contenido total de electrones vertical debido a que dentro de sus cálculos estima un factor de inclinación que debe ser multiplicado al tiempo de retraso.

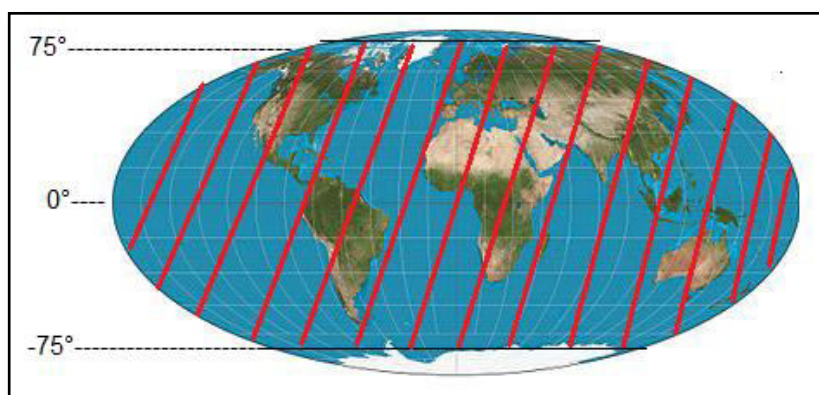


Figura 10.- Consideraciones del modelo de Klobuchar

Fuente: Adaptado de (Cia - The World Factbook, 2005)

2.4.3 Variables

Para el desarrollo del algoritmo de Klobuchar se requieren tres datos de entrada base:

- Coordenadas de las estaciones terrestres
- Coordenadas de satélites
- Coeficientes ionosféricos

En el año de 1989 durante la campaña europea EUREF89 el Instituto de Astronomía de la Universidad de Bern en Suiza realizó la primera propuesta para la existencia de un solo formato internacional de intercambio de datos GNSS entre receptores independientes, denominado por las siglas RINEX (Receiver Independent Exchange Format) (Werner, 2007), por lo tanto, es un documento estandarizado orientado a guardar información sobre las medidas dadas por los sistemas de navegación por satélites hacia los receptores. Los archivos RINEX pueden abarcar archivos de observación y navegación que guardan diferente información como las pseudodistancias, altura de satélites y coordenadas aproximadas de la estación terrestre en los archivos de observación mientras que en los de navegación se encuentra la información de los coeficientes ionosféricos necesarios para aplicar el algoritmo de Klobuchar, tiempo de efemérides e información de los relojes del satélites, entre otros.

Las coordenadas aproximadas de la estación pueden ser extraídas para formar parte de los datos de entrada en el algoritmo; sin embargo, estos archivos pueden ser procesados con algún software como Bernese para obtener coordenadas precisas. Las coordenadas necesariamente deben ser transformadas a coordenadas geodésicas en latitud y longitud ya que se encuentran en coordenadas rectangulares espaciales tridimensionales.

Las coordenadas de satélites pueden ser calculadas en base a las coordenadas de la estación terrestre a través del cálculo de azimut y el ángulo de elevación, sin embargo, se puede obtener la posición en coordenadas rectangulares espaciales tridimensionales cada quince minutos en la página web

<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/gps>, dentro de este sitio web están los archivos diarios de la posición de 32 satélites que se encuentran orbitando en el espacio pertenecientes al sistema GPS y que pueden ser captados por las estaciones terrestres cada 30 segundos. Los archivos son diarios y tienen la extensión sp3. Dentro del archivo RINEX de observación se puede distinguir los diferentes sistemas de posicionamiento del mundo utilizando letras, por ejemplo para el sistema GPS se usa la letra G mientras que para el sistema GLONASS la letra R seguidos de un número que identifica a cada satélite. Los archivos del IGS (International GNSS Service) tienen las letras PG antes del número del satélite, la figura 11, indica los códigos para la identificación de satélites en archivos IGS y RINEX de observación, cabe mencionar que para el ejemplo solo se observan satélites GPS, es decir, con la letra G.

Código de identificación de cada satélite				Código de Identificación de los Satélites			
PG01	14152.954728	6493.821096	21497.986162	08 10 8 0 0 0.0000000 0	17G02G04G08G09G10G12G13G15G17G24G26G28		
PG02	13646.199185	18427.151712	-13731.738096	23071575.364	121242008.916	8	-807.452
PG03	-23145.158544	-11198.972774	-7479.048655	94474310.11346			46.250
PG04	7051.903340	25170.554149	-3807.929612	23959169.793	125906329.843	7	23071573.738
PG05	16632.474657	4884.084887	-20177.690832	98108861.43444			41.000
PG06	-20350.098862	-14002.782580	-9974.175504	25487877.114	133939744.377	6	-1584.945
PG07	-7496.988442	20107.400937	-15465.994127	104368657.56843			35.500
PG08	-1596.257743	25637.874924	-5361.502440	24631551.663	129439707.010	6	-1693.530
PG09	14329.841452	-1944.280466	21732.375925	100862139.01944			40.500
PG10	-827.508196	18341.928777	-19292.375411	20287593.854	106612088.120	9	25487877.998
PG11	-17644.827408	-284.737974	19546.572055	83074388.13649	604.229		29.000
PG12	22703.218995	-9514.855834	9440.148972	24028316.050	126269640.124	7	-191.886
PG13	-13300.843503	9173.264265	-21235.988526	98391923.38046	2430.684		41.500
PG14	-7190.891137	-17234.404821	19120.433363	25292003.843	132910369.925	6	34.750
PG15	25259.710417	2463.122734	8116.456801	103566520.13044			41.500
PG16	-15686.063139	-5591.223291	-20745.410046	24446954.594	128469642.208	7	24631554.789
PG17	4972.333850	17081.867606	19951.096550	100106247.02845	1903.957		34.750
PG18	15124.737892	-20089.518111	8294.619074	22378061.208	117597552.898	9	775.429
PG19	-25032.833504	-7204.352681	6082.130061	91634462.12547	493.378		51.500
PG20	-22213.897897	12074.253346	7859.808295	25042541.965	131599440.970	4	49.750
PG21	4913.709803	-22943.784083	-11403.708607	102545036.35651	329.151		44.500
PG22	2169.184160	-19246.541707	18302.214447	23930653.155	125756483.053	8	39.750
PG23	-21690.390888	2983.612576	-15257.088500	97992055.73345	1907.563		39.750
PG24	20000.075636	-17437.143882	-640.860552	21911741.904	115147050.726	9	-1275.722
PG25	22858.183965	13557.874149	-3820.289439	89725020.15747	-2318.348		39.750
PG26	15773.393569	6096.009934	21228.449416	23934274.501	127942462.080	4	-1275.722
PG27	-5938.641740	19322.037195	17644.459965				39.750
PG28	14368.207663	-9238.023025	-20264.223229				39.750
PG29	-7970.094062	-13633.764326	-21708.143132				39.750
PG30	-7706.514580	-24552.082123	-5858.483149				39.750
PG31	-7706.514580	-24552.082123	-5858.483149				39.750
PG32	-22133.551838	2905.083620	14265.762784				39.750

Figura 11.- Identificación de satélites

Los coeficientes ionosféricos forman parte del archivo de navegación y son exclusivos del sistema GPS, corresponden a ocho valores en total (cuatro para α y cuatro para β) y son actualizados por el segmento de control del sistema GPS de acuerdo con la estación del año y la actividad solar, razón por la cual son coeficientes diarios e independientes unos de otros y son la base fundamental para la aplicación del modelo empírico de Klobuchar ya que se utilizan en una ecuación polinómica de tercer grado. La unidad de estos coeficientes es segundos/semicírculo donde un semicírculo corresponde a π radianes. Los valores de α y β provienen del modelo ionosférico Bent que determina un conjunto de coeficientes para diferentes condiciones ionosféricas diarias y con un promedio de flujo solar de los últimos cinco días (Hoque & Jakowski, An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems, 2014).

2.4.4 Cálculos

Los cálculos básicos que se deben hacer en el algoritmo son cuatro: ángulo al centro de la Tierra, la transformación de coordenadas geodésicas a geomagnéticas, el tiempo local y el factor de inclinación. La figura 12, muestra algunos parámetros previos a obtener el VTEC a través del algoritmo de Klobuchar, como el ángulo al centro de la Tierra (ψ), el ángulo de elevación de la estación con respecto al satélite (E) y el azimut del satélite (A), además de la localización del punto ionosférico (IPP) y subionosférico (SIP).

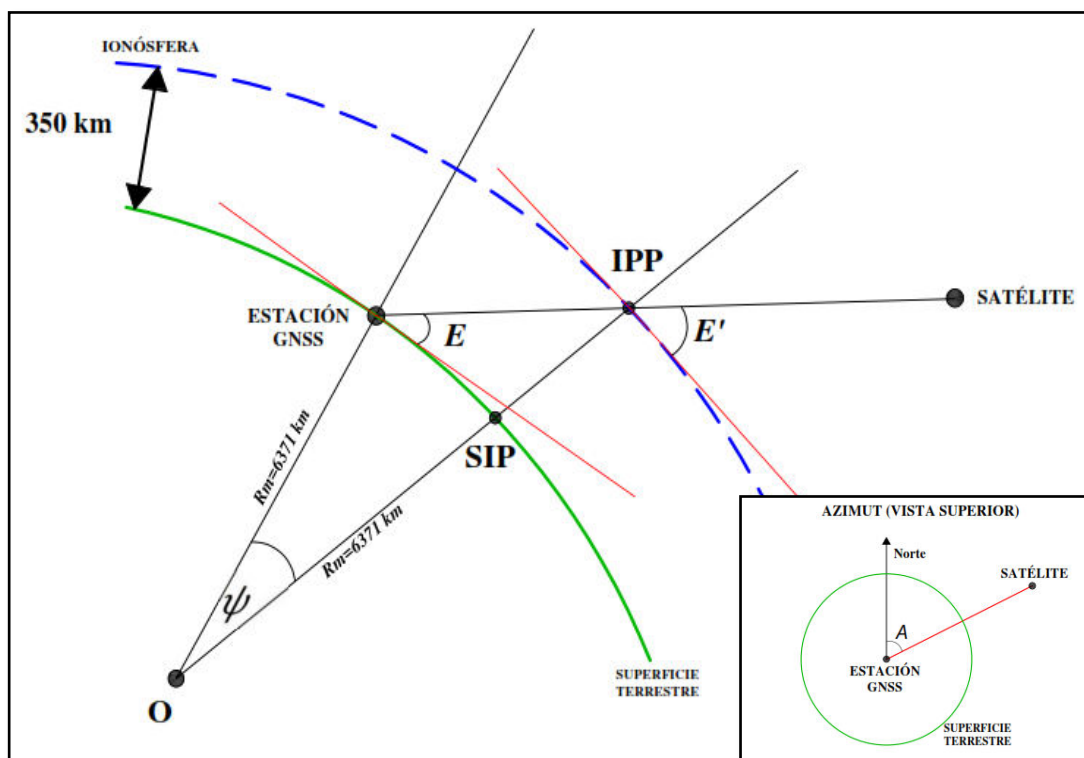


Figura 12. Parámetros algoritmo de Klobuchar

Fuente: Adaptado de (Angrisano, et al., 2011)

2.4.4.1 Ángulo al centro de la Tierra

El ángulo de la Tierra está en función del ángulo de elevación entre la estación terrestre y el satélite observado, la ecuación (2.12) muestra una forma de encontrar dicho ángulo de elevación:

$$E = \text{atan} \left(\frac{\cos(G) \cos(\phi_E) - 0.1512}{\sqrt{1 - (\cos(G) \cos(\phi_E))^2}} \right) \quad (2.12)$$

Donde:

$$G = \lambda_S - \lambda_E$$

E : Es el ángulo de elevación en grados sexagesimales

ϕ_E : Es la latitud geodésica de la estación en grados sexagesimales

λ_E : Es la longitud geodésica de la estación en grados sexagesimales

λ_S : Es la longitud geodésica del satélite en grados sexagesimales

Con el dato de la elevación del satélite ya es posible estimar el ángulo al centro de la Tierra con la ecuación (2.13), las unidades de las coordenadas están en semicírculos

$$\psi = \frac{0.0137}{(E + 0.11)} - 0.022 \quad (2.13)$$

Donde:

ψ : Es el ángulo del centro de la Tierra en semicírculos

E : Es el ángulo de elevación en semicírculos

Para obtener el azimut que es usada para el cálculo de la latitud subionosférica teniendo en cuenta dos consideraciones:

- Si el satélite esta al este de la estación el azimut será igual a la ecuación (2.14):

$$A = \text{atan}\left(\frac{\tan(G)}{\sin(\phi_E)}\right) \quad (2.14)$$

- Si el satélite esta al oeste de la estación el azimut será igual a la ecuación (2.15):

$$A = 360^\circ - \text{atan}\left(\frac{\tan(G)}{\sin(\phi_E)}\right) \quad (2.15)$$

2.4.4.2 Latitud y longitud geodésicas del punto subionosférico

Para estimar estas coordenadas es necesario tener los datos del azimut y el ángulo del centro de la Tierra en unidades de semicírculo. Dentro del cálculo de la latitud del IPP (Ionosphere Pierce Point) existe una condición para que el valor del retraso ionosférico esté dentro de las latitudes medias comprendidas entre $\pm 75^\circ$ cuyo valor en unidades de semicírculos corresponde a 0,416 como se indica en la ecuación (2.16):

$$\phi_I = \phi_U + \psi \cos A \quad (2.16)$$

$$\text{Si } \phi_I > 0.416 \Rightarrow \phi_I = 0.416 \vee \phi_I \leq 0.416 \Rightarrow \phi_I = -0.416$$

Donde:

ϕ_I : Es la latitud del punto subionosférico en semicírculos

ϕ_E : Es la latitud geodésica de la estación terrestre en semicírculos

ψ : Es el ángulo del centro de la Tierra en semicírculos

A : Es el azimut en radianes

Para la longitud del punto subionosférico se usa la ecuación (2.17)

$$\lambda_I = \lambda_U + \left(\psi \frac{\sin A}{\cos(\phi_I \pi)} \right) \quad (2.17)$$

Donde:

λ_I : Es la longitud del punto subionosférico en semicírculos

λ_U : Es la longitud de la estación terrestre en semicírculos

A : Es el azimut en radianes

ϕ_I : Es la latitud subionosférica en semicírculos; pero, el argumento está multiplicado por π para el cálculo del coseno en radianes.

Con las coordenadas del punto subionosférico se puede obtener la latitud geomagnética que es la más importante en el modelo de acuerdo con la ecuación (2.18)

$$\phi_m = \phi_I + 0.064 \cos((\lambda_I - 1.617) \pi) \quad (2.18)$$

Donde:

ϕ_m : Es la latitud geomagnética en semicírculos

ϕ_I : Es la latitud del punto subionosférico en semicírculos

λ_I : Es la longitud del punto subionosférico en semicírculos; pero, el argumento está multiplicado por π para el cálculo del coseno en radianes.

2.4.4.3 Tiempo local

Para el cálculo del tiempo local se usa el tiempo GPS en segundos que corresponde a la hora del día en que se hizo la observación o de la cual se desea saber el retraso ionosférico y, además, se requiere de la longitud subionosférica como se indica en la ecuación (2.19).

$$t = 43200 \lambda_I + \text{Tiempo}_{GPS} \quad (2.19)$$

El valor de 43200 está en segundos que representan los segundos de 12 horas y λ_I es la longitud subionosférica. Siempre se debe garantizar que el tiempo sea positivo o que esté comprendido en el rango de un día, por ello debe cumplir con la siguiente condición:

$$\text{Si } t > 86400 \Rightarrow t = t - 86400 \vee t \leq 86400 \Rightarrow t = t + 86400$$

2.4.4.4 Factor de inclinación

Este parámetro es importante y debe ser multiplicado al tiempo de retraso para obtener un valor vertical del retraso, como indica la ecuación (2.20).

$$SF = 1 + 16 (0.53 - E)^3 \quad (2.20)$$

Donde E es el ángulo de elevación en semicírculos y SF es el factor de inclinación.

2.4.4.5 Periodo, amplitud, fase, retraso ionosférico y TEC

Los parámetros antes calculados son indispensables para establecer el período, la fase del modelo y la amplitud de la función coseno y con ello determinar el retraso ionosférico. Las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23) indican su forma de cálculo:

$$PER = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n = \beta_0 \phi_m^0 + \beta_1 \phi_m^1 + \beta_2 \phi_m^2 + \beta_3 \phi_m^3; \quad (2.21)$$

$$Si \ PER < 72000 \Rightarrow PER = 0$$

$$\bar{x} = \frac{2\pi(t - 50400)}{PER} \quad (2.22)$$

$$AMP = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n = \alpha_0 \phi_m^0 + \alpha_1 \phi_m^1 + \alpha_2 \phi_m^2 + \alpha_3 \phi_m^3 \quad (2.23)$$

$$Si \ AMP < 0 \Rightarrow AMP = 0$$

Donde:

PER : Es el período del modelo

AMP : Es la amplitud de la función del modelo

β_n : Es el valor de los coeficientes ionosféricos de Klobuchar para beta en seg/semicírculos

ϕ_m^n : Es la latitud geomagnética en semicírculos

\bar{x} : Es la fase del modelo en segundos

t : Es el tiempo local y 50400 es el valor en segundos de las 14 horas que corresponden al comportamiento diurno de la ionosfera.

α_n : Es el valor de los coeficientes ionosféricos de Klobuchar para alpha en seg/semicírculos.

En función del valor de x que es la fase del modelo se determina el valor del

$$\text{Si } |\bar{x}| > 1.57 \Rightarrow T_{iono} = SF (5 \times 10^{-9}) \quad (2.24)$$

tiempo de retraso que debe estar multiplicado al factor de inclinación

Caso contrario

$$T_{iono} = SF \left[(5 \cdot 10^{-9}) + AMP \left(1 - \frac{\bar{x}^2}{2} + \frac{\bar{x}^4}{24} \right) \right] \quad (2.25)$$

Donde:

T_{iono} : Es el tiempo de retraso ionosférico, $5 \cdot 10^{-9}$ es el valor que representa el comportamiento nocturno de la ionosfera en segundos.

SF : Es el factor de inclinación

Para calcular el error en la distancia se usa el valor del tiempo de retraso

$$Rd_{iono} = T_{iono} C \quad (2.26)$$

Donde:

Rd_{iono} : Distancia de retraso en metros

C : es la velocidad de la luz correspondiente a 3×10^8 m/seg

Finalmente, aplicando la ecuación (2.27) se puede obtener el valor de TEC

$$TEC = \frac{Rd_{iono} \cdot f_1^2}{40.3} \quad (2.27)$$

Donde:

f_1^2 : Es el valor de una sola frecuencia correspondiente a 1575.42 MHz al cuadrado
El valor constante del denominador está en unidades de m^3/s^2

2.4.5 Limitaciones del modelo

El porcentaje de error que se corrige con la aplicación de este modelo empírico es aproximadamente de un 50 a 60%, dependiendo del ciclo solar de la región (Lee & Park, 2011). Un limitante principal es que los datos de los coeficientes no están disponibles en tiempo real, por lo general se demoran un día para estar liberados en internet evitando que la corrección ionosférica se haga de forma inmediata y, por tanto tenga menos precisión en su corrección ionosférica comparado por ejemplo con el modelo NeQuick usado en el sistema de navegación Galileo que realiza una corrección alrededor del 70% y en tiempo real (Hoque & Jakowski, 2014). Otro factor que reduce el porcentaje de efectividad del modelo de Klobuchar es que considera a la ionósfera como una capa simple, cuando esta parte de la atmósfera posee tres regiones con comportamientos diferentes a lo largo del día lo que provoca que su resultado sea un promedio del retraso vertical en la señal.

2.5 SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es una secuencia de N observaciones (datos) ordenados y equidistantes cronológicamente sobre una (serie univariante) o varias características (serie multivariante) de una unidad observable en diferentes momentos (Mauricio, 2007). Su representación matemática viene dado por la expresión (2.28):

$$z_1, z_2, \dots, z_T; (z_t)_{t=1}^T \quad (2.28)$$

Donde:

z_t : Es la observación de la variable a analizarse

T : Es el número de observaciones que consta la serie completa

Las T observaciones pueden almacenarse en un vector columna $z_t = [z_1, z_2, \dots, z_T]'$ de orden $N \times 1$. Las series temporales pueden presentar diferentes propiedades como son: la estacionaridad que hace referencia a si la serie oscila alrededor de un nivel constante o no; la estacionalidad que indica la existencia o no de un comportamiento superpuesto que se repite a lo largo del tiempo (periodicidad); y la tendencia que puede ser positiva (creciente) o negativa (decreciente) (Peña, 2010). Los análisis respectivos a cada propiedad pueden permitir el modelado matemático del comportamiento de la variable analizada a lo largo del tiempo y de esta manera poder predecir el valor en un futuro con cierta precisión.

2.5.1 Análisis de tendencia

La tendencia podría definirse como un cambio ascendente o descendente de un conjunto de datos respecto a su media a largo plazo o como un cambio que se produce en relación al nivel medio. La tendencia se caracteriza por un movimiento suave en la serie a largo plazo (Marin, 2010). Se puede hablar de tendencias deterministas o estocásticas, dependiendo si las series poseen o no un nivel constante siendo muy raro el caso de que no la posea, de este modo se enfocará de manera particular al análisis de tendencias deterministas. Para poder realizar este análisis se

parte de que la serie temporal es no estacionaria, de este modo observando si la serie posee un solo sentido de crecimiento se puede determinar su tendencia con una regresión lineal como la expresión (2.29).

$$\mu_t = \gamma_0 + \gamma_1 t \quad (2.29)$$

Donde:

γ_0 : Es la intersección con el eje Y

γ_1 : Es la pendiente de la recta que describe la evolución de la serie.

μ_t : Es el nivel de serie (media o tendencia)

La ecuación (2.29) corresponde al crecimiento esperado entre dos periodos (Peña, 2010) en base al valor obtenido de la pendiente, se puede determinar si la serie posee o no una tendencia, es decir, si dicho valor se aproxima a cero la serie carecerá de esta propiedad y se la considerará como una serie estacionaria. La figura 13, muestra un ejemplo de una serie temporal con tendencia creciente.

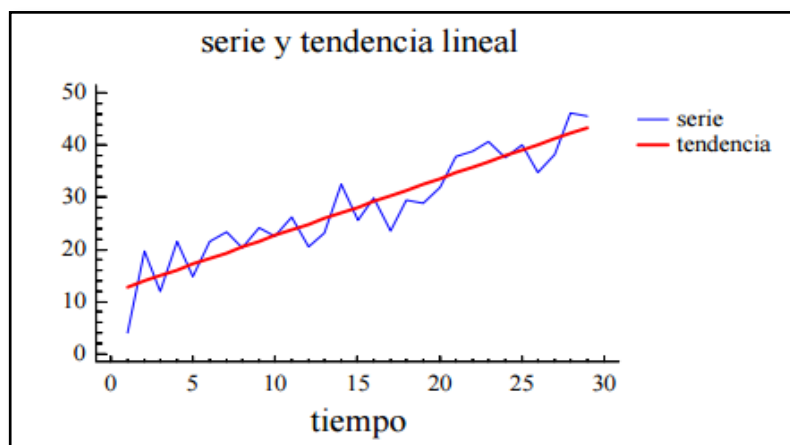


Figura 13. Ejemplo de una serie temporal con tendencia lineal

Fuente: (Marin, 2010)

2.5.2 Estacionalidad

Son movimientos repetitivos que se producen sistemáticamente a lo largo de la trayectoria de la serie y, generalmente representan las fluctuaciones que se registran de forma constante en periodos de tiempo (Universidad de Granada, 2015). Cuando la serie además de tendencia y componente aleatorio tiene estacionalidad, los métodos de descomposición para series estacionales suponen que los datos se generan como la suma de estos tres efectos tal como se muestra en la ecuación (2.30).

$$z_t = \mu_t + S_t + a_t \quad (2.30)$$

Donde:

z_t : Es la representación de la serie temporal

S_t : Es el componente estacional

a_t : Es el componente puramente aleatorio o innovación

El nivel μ_t puede ser modelado mediante un polinomio en función del tiempo de orden menor o igual a dos dependiendo del comportamiento de su tendencia, y a la estacionalidad como una función periódica (Peña, 2010).

Estacionalidad y ajuste de ciclos

La estacionalidad puede ser modelada mediante una función armónica de periodo s , es decir que el componente estacional $S_{t'}$ de la serie temporal puede ser representada como una función periódica con $S_{t'} = S_{t'-s}$, las funciones armónicas $\sin\left(\frac{2\pi t'}{s}\right)$ y $\cos\left(\frac{2\pi t'}{s}\right)$ representan a dichas funciones, para $t' = 1, \dots, T$, donde se ha tomado el tamaño muestral, T , cuya frecuencia es la inversa del periodo la cual

indica la fracción de un ciclo completo que se observa entre dos unidades de tiempo, por lo tanto la frecuencia es la inversa del tiempo. Por ejemplo, en una serie trimestral ($s = 4$), la frecuencia es $f = \frac{1}{4} = 0.25$, indicando que entre dos observaciones ha transcurrido el 25% de un ciclo completo (Peña, 2010).

De manera análoga la ecuación (2.31) muestra la frecuencia angular, la cual indica el ángulo en radianes recorrido en una unidad de tiempo, considerando que 2π representa un ciclo completo.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/s \quad (2.31)$$

La estacionalidad puede ser representada por uno o varios ciclos. Para el primer caso se supone que la serie z_t tiene una estacionalidad cíclica de período s , y frecuencia angular ω . La primera observación de la serie no será en general el valor medio del ciclo como corresponde a la función seno, sino que la onda sinusoidal que describe la estacionalidad comenzará en la primera observación con cierto ángulo de desfase llamado $\bar{\theta}$, el cual es desconocido. Además, el ciclo tendrá también una amplitud que es desconocida, estas oscilaciones se producirán alrededor del valor medio μ_t de la serie, el cual será constante en el tiempo, adicional a esto se supondrá que existe un error aleatorio que se encuentra superpuesto a la estacionalidad de media cero, varianza constante y distribución normal, de tal forma el modelo está representado por la ecuación (2.32) de la siguiente forma:

$$z_t = \mu_t + R \sin(\omega t' + \bar{\theta}) + a_t \quad (2.32)$$

Donde:

$\bar{\theta}$: Es el ángulo de desfase desconocido

R : Amplitud desconocida

a_t : Es el componente aleatorio.

Aplicando identidades trigonométricas, el modelo anterior puede ser escrito de la siguiente forma:

$$z_t = \mu_t + R \sin(\omega t') \sin \theta + R \cos(\omega t') \cos \theta + a_t \quad (2.33)$$

Usando un cambio de variable se tiene que:

$$z_t = \mu_t + A' \sin(\omega t') + B' \cos(\omega t') + a_t \quad (2.34)$$

Siendo:

$$A' = R \sin \bar{\theta}$$

$$B' = R \cos \bar{\theta}$$

La expresión del modelo de la ecuación (2.34) representa a la serie como la suma de dos funciones sinusoidales de frecuencia angular conocida y con parámetros desconocidos, $\bar{\theta}$ y R , contenidos de manera implícita en A' y B' , las cuales se han transformado en las dos amplitudes desconocidas y se estimarán a partir de los datos por medio de una ecuación de regresión múltiple por mínimos cuadrados y su aplicación a funciones sinusoidales, cuya demostración se encuentra en el apéndice 2.1 del libro *Análisis de Series Temporales* de Daniel Peña, 2010. Los resultados de estas estimaciones se muestran en las ecuaciones (2.35), (2.36) y (2.37).

$$\hat{\mu} = \frac{1}{T} \sum_{t'=1}^T z_t \quad (2.35)$$

$$\hat{A}' = \frac{2}{T} \sum_{t'=1}^T z_{t'} \sin(\omega t') \quad (2.36)$$

$$\hat{B}' = \frac{2}{T} \sum_{t'=1}^T z_{t'} \cos(\omega t') \quad (2.37)$$

Los residuos del modelo se calculan mediante la ecuación (2.38).

$$\hat{a}_t = z_t - \hat{\mu}_t - \hat{A}' \sin(\omega t') - \hat{B}' \cos(\omega t') \quad (2.38)$$

Cuya media es cero y su varianza se representa por la ecuación (2.39):

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{a}_t^2 \quad (2.39)$$

Este modelo se ajusta cuando la estacionalidad es exactamente sinusoidal, sin embargo, no para funciones periódicas generales. Con lo cual Fourier demostró que toda función periódica puede representarse como la suma de funciones sinusoidales de distinta amplitud y frecuencia lo que permite generalizar el análisis realizado para un ciclo donde la función periódica sea la suma de varias funciones armónicas con distintas frecuencias (Peña, 2010).

Una serie de longitud T , tiene periodos de Fourier, que son fracciones exactas completas del tamaño muestral y están definidos por:

$$s_j = \frac{T}{j}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, \frac{T}{2}$$

Para el ajuste de ciclos se usa generalmente las frecuencias en lugar de periodos, siendo las frecuencias de Fourier las inversas de los periodos:

$$f_j = \frac{j}{T}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, \frac{T}{2}$$

Teniendo que $1/2 \geq f_j \geq 1/T$, siendo el máximo valor de frecuencia igual a 0,5 y conocida como la *frecuencia de Nyquist*. En base a lo explicado se obtiene una representación general de una función periódica como suma de ondas asociadas a todas las frecuencias de Fourier, cuyo modelo está representado en la ecuación (2.40):

$$z_t = \hat{\mu}_t + \sum_{j=1}^{T/2} \hat{A}_j \sin(\omega_j t) + \sum_{j=1}^{T/2} \hat{B}_j \cos(\omega_j t) \quad (2.40)$$

La ecuación (2.40) contiene tantos parámetros como observaciones, por lo que siempre ajustará exactamente cualquier serie observada. Sin embargo, no es recomendable usar todos los periodos o frecuencias de Fourier porque no todos aportan significativamente al comportamiento del fenómeno, una herramienta que permite seleccionar que periodos a incluir al modelo es el *periodograma*.

El periodograma es conocido como la representación de la contribución de cada frecuencia ω_j o f_j y, puede verse como una herramienta para la detección de posibles ciclos deterministas en una serie temporal (Peña, 2010). Para una serie temporal el periodograma puede ser estimado mediante la técnica del espectro de Fourier para series de N observaciones discretas $z_t, (t = 1, \dots, N)$ de igual distancia (Scargle,

1982). El periodograma es definido a partir de la transformada discreta de Fourier (TDF) como indica la ecuación (2.41).

$$P(f_n) = \frac{1}{N} \left[\left(\sum_{j=1}^N z_t \cos 2\pi_j f n \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N z_t \sin 2\pi_j f n \right)^2 \right] \quad (2.41)$$

Donde:

$f n = n/T$, siendo T el periodo fundamental

$n = 1, \dots, N/2$

Las consideraciones de $P(f_n)$ es que posee distribución exponencial de la variable aleatoria, valor de esperanza igual a la varianza de la variable analizada (Mao, Christopher, Harrison, & Dixon, 1999) el modelo de la ecuación (2.42) se adapta a las observaciones con una frecuencia dada

$$z_t + \varepsilon_j = A' \cos 2\pi(t_j - \tau)f + B' \sin 2\pi(t_j - \tau)f \quad (2.42)$$

Donde:

ε_j : Son los errores independientes de media cero y varianza común

A', B' : Son las amplitudes desconocidas para cada frecuencia

t_j : Es tiempo de la observación

f : Es la frecuencia

τ : Es una variable de simplificación al modelo como:

$$\tan(4\pi f \tau) = \frac{\sum_{j=1}^N \sin 4\pi t_j f}{\sum_{j=1}^N \cos 4\pi t_j f}$$

El periodograma puede ser derivado como muestra la ecuación (2.43).

$$P(f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_{j=1}^N z_t \cos 2\pi(t_j - \tau)f]^2}{\sum_{j=1}^N z_t \cos^2 2\pi(t_j - \tau)f} + \frac{[\sum_{j=1}^N z_t \sin 2\pi(t_j - \tau)f]^2}{\sum_{j=1}^N z_t \sin^2 2\pi(t_j - \tau)f} \right\} \quad (2.43)$$

Según (Scargle, 1982) demostró que este periodograma resultante tiene la misma distribución de probabilidad exponencial para datos uniformemente espaciados. Esta expresión puede ser usada para evaluar cualquier frecuencia de una serie obteniendo valores para cada una, siendo las que posean mayor valor las más importantes y deberán ser las consideradas en el modelo demostrado por Fourier, a estas frecuencias se las conocen como frecuencias o periodos fundamentales como se muestra en la figura 14 donde los valores altos son los más representativos y deben estar incluidos en el modelo matemático de Fourier.

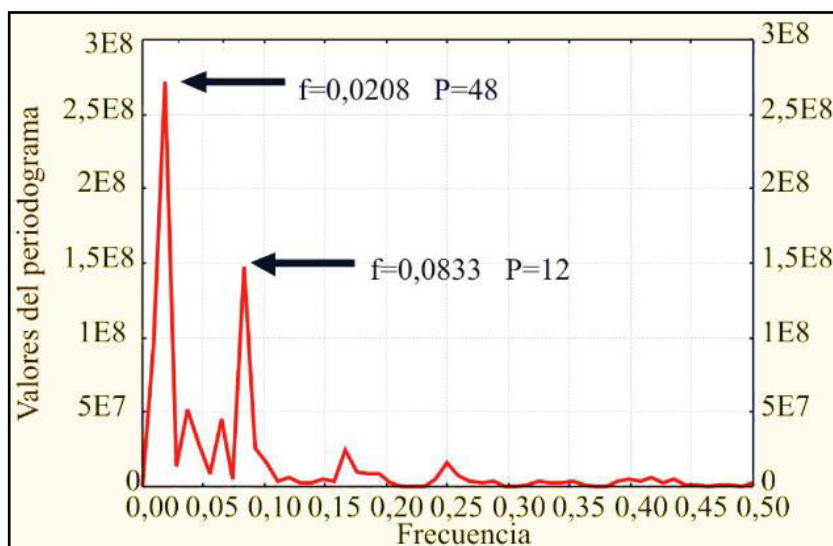


Figura 14. Grafica de valores de periodograma para cada frecuencia analizada

Fuente: (Coutin, 2007)

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 PREPARACIÓN DE DATOS

Para aplicar el algoritmo de Klobuchar es necesario contar con tres tipos de datos de entrada: el número de satélites observados de la estación terrestre a cada hora, los coeficientes ionosféricos diarios y las coordenadas precisas del satélite observado. La recolección de esta información fue proporcionada por el servidor del IGM para la descarga de datos geodésicos y el portal de la NASA para descargar los archivos sp3 correspondientes a efemérides precisas.

3.1.1 Archivos RINEX

Los RINEX están conformados por los archivos de observación con la extensión D que corresponde a una compresión HATANAKA y por los archivos de navegación con extensión N que se los obtiene directamente del Geoportal del Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Los archivos de observación serán usados para conocer los satélites observados a cada hora por la estación mientras que de los archivos de navegación se extraerá los coeficientes ionosféricos.

HATANAKA es un formato que comprime y descomprime archivos GNSS de observación en formato RINEX, se lo usa con frecuencia para facilitar el intercambio de datos vía internet. Para descomprimir la información se usa el programa CRX2RNX, el cual devuelve un archivo con extensión *añoO* (Ej: .11O). Para la descompresión masiva de la información se usó la plataforma LINUX.

3.1.2 Archivos de Efemérides Precisas

Estos archivos son completamente libres y están disponibles en el repositorio de la NASA donde se ingresa de manera directa bajo la siguiente dirección electrónica <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/gps>, la información se encuentra clasificada de acuerdo al número de semana GPS y al día dentro de la semana y está comprimida en formato ZIP. La figura 15, muestra una captura del servidor de descarga de los archivos sp3, los cuales se encuentran resaltados con una línea roja y corresponden a siete archivos, donde los días de la semana se los distingue por el último dígito de su nombre que va desde el 0 hasta el 6, se debe recordar que el 0 representa al día domingo como inicio de semana.

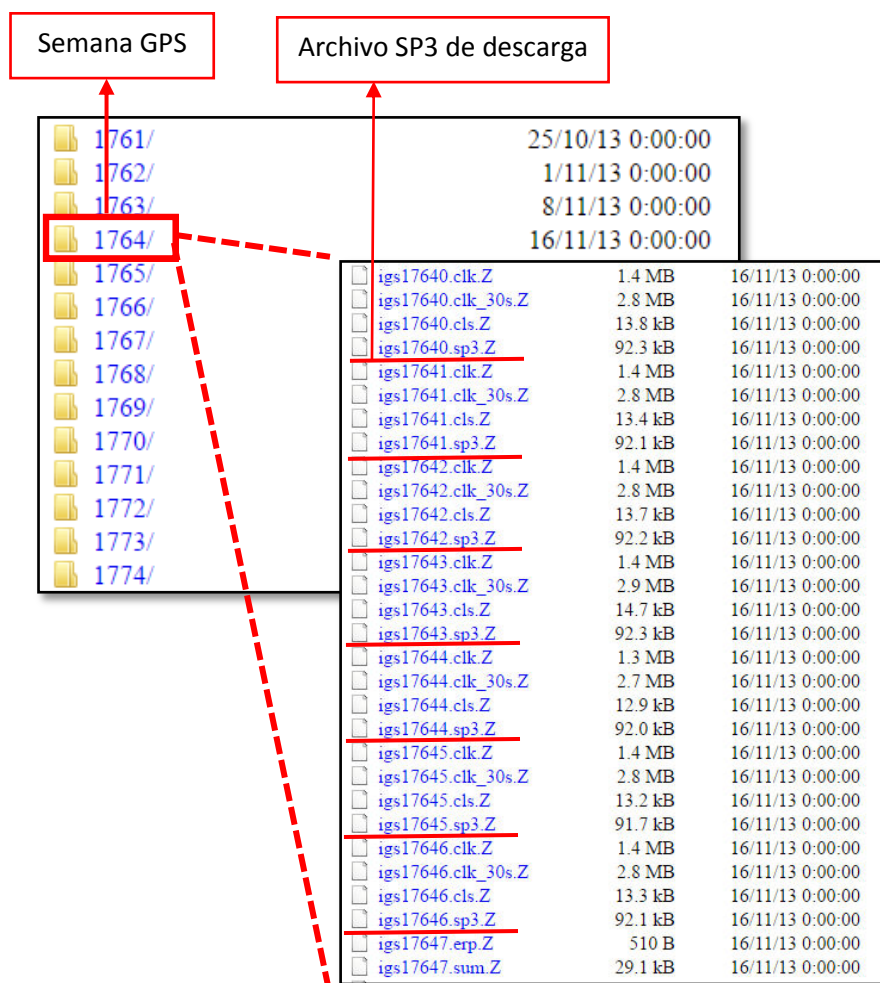


Figura 15. Proceso de descarga de efemérides precisas

3.2 PROCESAMIENTO

Con los datos obtenidos anteriormente se extrajo la información de interés de cada tipo de archivo utilizando como herramienta el software Matlab y la Plataforma LINUX según sea el caso.

Para organizar la información se crearon varias carpetas en el disco local C permitiendo así tener una dirección general (path) para que cualquier usuario externo pueda realizar los procesos de extracción con los programas sin ningún inconveniente para cualquier estación y año que se requiera. La figura 16, indica la organización de las carpetas para guardar la información para el procesamiento de datos, dentro de la carpeta LIST_SAT se puede encontrar los archivos que contienen los satélites observados para cada estación de monitoreo continuo en el Ecuador además de los archivos sp3 ya filtrados por hora con las coordenadas de los satélites observados en formato texto, la carpeta RESULTADOS abarca los valores diarios de VTEC generados para cada estación procesada, la carpeta SERIES contiene las bases de datos total de todos los años de estudio para cada estación, en la carpeta SP3 se encuentran los archivos crudos de efemérides precisas tomados cada 15 minutos y la carpeta XYZ_EST tiene los archivos de entrada para la aplicación del algoritmo de Klobuchar, es decir, los coeficientes ionosféricos, las coordenadas de las estaciones terrestres y de los satélites observados.

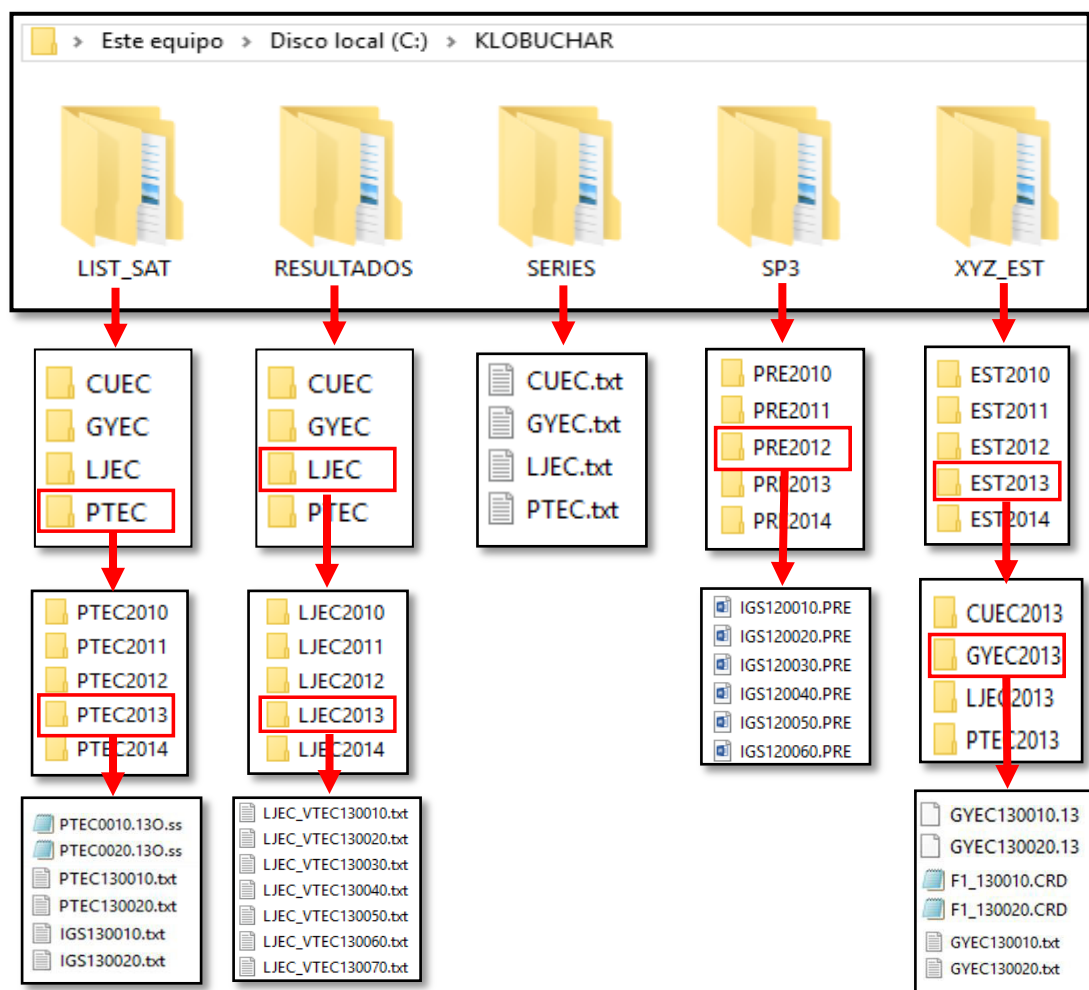


Figura 16. Orden jerárquico de las carpetas

3.2.1 Satélites observados por Estaciones REGME

De los archivos de observación se necesitó la lista de satélites de la constelación GPS que la estación terrestre observó a cada hora del día durante los 365 días del año desde el 2010 hasta el 2014. Para extraer dicha información se realizó un script en LINUX denominado *obs_sat.sh* (Ver anexo 1, figura 1) cuyo resultado fue un archivo diario con un nombre de 8 caracteres: los 4 primeros corresponden al nombre de la estación terrestre, los 3 siguientes al día GPS seguido de un cero adicional al final, la primera extensión indica el año en tratamiento acompañado de una O (.100)

que indica que es un archivo RINEX de observación y la segunda (.ss) indica la información del listado de los satélites observados a cada hora como se muestra en la figura 17.

	A	M	D	H	Mi	Seg	Satélites rastreados
CUEC0010.10O.ss	10	1	5	0	0	0.0000000	0 15G09G12G14G18G21G22G24G26G27G29G30G31
CUEC0020.10O.ss	10	1	5	1	0	0.0000000	0 13G12G14G18G21G22G24G26G29G30G31R08R11
CUEC0030.10O.ss	10	1	5	2	0	0.0000000	0 14G12G14G16G18G21G22G24G26G29G30G31R02
CUEC0040.10O.ss	10	1	5	3	0	0.0000000	0 15G06G14G16G18G21G22G26G29G30G31R02R03
CUEC0050.10O.ss	10	1	5	4	0	0.0000000	0 15G03G06G14G16G18G21G22G26G29G31R02R03
CUEC0060.10O.ss	10	1	5	5	0	0.0000000	0 14G03G06G14G16G18G19G22G26G31G32R02R03
CUEC0070.10O.ss	10	1	5	6	0	0.0000000	0 14G03G06G14G16G19G20G22G26G31G32R02R03
CUEC0080.10O.ss	10	1	5	7	0	0.0000000	0 13G03G06G11G14G16G19G20G23G31G32R03R17
CUEC0090.10O.ss	10	1	5	8	0	0.0000000	0 14G03G06G11G13G19G20G23G31G32R03R15R17
CUEC0100.10O.ss	10	1	5	9	0	0.0000000	0 14G03G06G11G13G19G20G23G31G32R15R17R18
CUEC0110.10O.ss	10	1	5	10	0	0.0000000	0 12G07G11G13G17G19G20G23G32R15R18R19R20
CUEC0120.10O.ss	10	1	5	11	0	0.0000000	0 13G07G08G11G13G17G20G23G32R09R15R19R20
CUEC0130.10O.ss	10	1	5	12	0	0.0000000	0 15G04G07G08G11G13G17G20G23G28G32R09R15
CUEC0140.10O.ss	10	1	5	13	0	0.0000000	0 14G02G04G07G08G11G13G17G20G23G28G32R09
CUEC0150.10O.ss	10	1	5	14	0	0.0000000	0 11G02G04G07G08G10G13G17G20G28R07R09R10
CUEC0160.10O.ss	10	1	5	15	0	0.0000000	0 13G02G04G05G07G08G10G13G17G28R07R09R11
CUEC0170.10O.ss	10	1	5	16	0	0.0000000	0 16G02G04G05G08G09G10G13G17G27G28R07R08
	10	1	5	17	0	0.0000000	0 17G02G04G05G08G09G10G12G13G15G17G27G28
	10	1	5	18	0	0.0000000	0 15G02G04G05G09G10G12G15G17G27G28R07R08
	10	1	5	19	0	0.0000000	0 14G02G04G05G09G10G12G15G17G27G30R02R08
	10	1	5	20	0	0.0000000	0 15G02G04G05G09G12G15G18G24G27G29G30R02
	10	1	5	21	0	0.0000000	0 13G02G04G09G12G15G18G24G26G27G29G30R02
	10	1	5	22	0	0.0000000	0 15G02G09G12G14G15G18G21G24G26G27G29G30
	10	1	5	23	0	0.0000000	0 15G02G05G09G12G14G18G21G24G26G27G29G30

A: año M: mes D: día H: hora Mi: minutos Seg: segundos

Figura 17. Ejemplo de archivo de salida del script obs_sat.sh.

Como se observa en la figura 17 cada columna posee diferente información que especifica el año, mes, día, hora, minutos, segundos y la lista de satélites rastreados a cada hora, en la última columna los dos primeros números indican la cantidad de satélites que fueron observados en esa hora mientras que las letras G y R corresponden a dos tipos de constelación de satélites, siendo GPS y GLONASS respectivamente. En este caso solo se necesita de los satélites de la constelación GPS.



Sin embargo, el archivo es de tipo texto y debe ser transformado a un vector columna, para este proceso se usó el software Matlab con un script denominado *list_sat.m* (Ver anexo 1, figura 4) cuyo resultado fue obtener un listado con un rango de seis a nueve satélites GPS observados para cada hora y estación en la figura 18 se observa el resultado obtenido al ejecutar el script, donde se generaron cinco columnas que corresponden al año, mes, día, hora y número de satélite GPS extraídos del archivo de observación a cada hora del día.

AÑO	MES	DÍA	HORA	SAT OBSERVADO
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	9.0000000e+00
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.2000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.4000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.8000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.1000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.2000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.4000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.6000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.7000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	1.4000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	1.8000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	2.1000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	2.2000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	2.4000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	2.6000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	2.9000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	3.0000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	1.2000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	1.4000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	1.6000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	1.8000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	2.1000000e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	2.2000000e+01

Figura 18. Lista de satélites observados

3.2.2 Coeficientes ionosféricos

Los coeficientes ionosféricos se encuentran en el encabezado del archivo RINEX de navegación, fueron extraídos en LINUX con un script denominado *ion_nav.sh* (Ver anexo 1, figura 2) arrojando como resultado archivos diarios para cada estación terrestre, el nombre de los archivos resultado posee 10 caracteres: los cuatro primeros corresponden al nombre de la estación GNSS seguido por dos dígitos que pertenecen al año y los tres siguientes que indican el día GPS más un cero adicional al final. Este archivo de salida tiene como extensión el año en tratamiento, los parámetros requeridos son los iones alpha y beta que serán de uso para calcular la amplitud y el período de la función coseno del algoritmo de Klobuchar. La figura 19, muestra el resultado de la ejecución del en el recuadro de la izquierda mientras que en cuadro derecho se encuentra enmarcado los valores de los coeficientes ionosféricos.

```

2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
tegc 2009Mar23  Marco Amores          20101208 21:04:14UTC / RUN BY / DATE
1.0245D-08 -1.4901D-08 -5.9605D-08  1.1921D-07  ION ALPHA
9.8304D+04 -1.4746D+05 -1.9661D+05  8.5197D+05  ION BETA
-9.313225746155D-10-3.552713678801D-15  233472  1612 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
15
MSXP|IAx86-PII|bcc32 5.0|MSWin95->XP|486/DX+  COMMENT
SPIDER V3,1,2,3092  IGM_EC          2010 11 29 02:01  COMMENT
END OF HEADER
1 10 11 28 4 0 0.0-1.862877979875D-04-3.524291969370D-12 0.000000000000D+00
3.300000000000D+01-6.321875000000D+01 4.515902318758D-09-1.920967152541D+00
-3.237277269363D-06 4.407775937580D-03 5.297362804413D-06 5.153530212402D+03
1.440000000000D+04 8.940696716309D-08 1.717609044740D-01-5.029141902924D-08
9.671315361105D-01 2.816562500000D+02 9.362545141871D-01-8.153911323916D-09
-1.028614277088D-10 1.000000000000D+00 1.612000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 1.000000000000D+00-1.909211277962D-08 3.300000000000D+01
1.440000000000D+04

```

Figura 19. Coeficientes ionosféricos

3.2.3 Coordenadas precisas de satélites observados

Los archivos con extensión PRE o sp3 poseen la posición de los satélites en coordenadas espaciales tridimensionales cada quince minutos, sin embargo para el

estudio de TEC se requiere las coordenadas a cada hora, con este fin se realizó un filtrado de la información a través de un script en el software Matlab denominado *lect_sp3.m* (Ver anexo 1, figura 3), cuyo resultado es una matriz con la información de: año, mes día, hora, satélite, y las coordenadas X,Y,Z. como se muestra en la figura 20.

AÑO	MES	DÍA	HORA	# SAT	X	Y	Z
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.0000000e+00	1.5075509e+04	4.3870891e+03	-2.1487849e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	3.0000000e+00	-2.2817619e+04	-7.2446639e+03	1.1511621e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	4.0000000e+00	9.1529588e+03	1.6926339e+04	-1.8315873e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	5.0000000e+00	2.5543221e+04	-1.3737259e+03	-7.3255756e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	6.0000000e+00	-2.2345087e+04	-1.0790728e+04	9.7999726e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	7.0000000e+00	-6.7828290e+03	2.5585867e+04	5.4819111e+02
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	8.0000000e+00	7.4945659e+02	2.3007408e+04	1.2745265e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	9.0000000e+00	1.4385036e+04	-1.5676368e+04	1.5209092e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.0000000e+01	2.3749626e+04	3.1749780e+03	-1.1996602e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.1000000e+01	-1.2021820e+04	1.8920370e+04	1.3724103e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.2000000e+01	2.2447097e+04	-1.1391338e+04	-8.2050010e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.3000000e+01	-9.8489232e+01	1.8751352e+04	-1.8930372e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.4000000e+01	-1.4139470e+04	-2.1756295e+04	6.1092647e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.5000000e+01	1.9170681e+04	5.8910607e+02	1.8443696e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.6000000e+01	-2.2716707e+04	-4.1015140e+03	-1.3313759e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.7000000e+01	1.5279085e+04	2.1308701e+04	4.9722849e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.8000000e+01	4.9025998e+03	-1.6458943e+04	2.0426672e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	1.9000000e+01	-1.8217696e+04	-3.7982845e+02	1.9456626e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.0000000e+01	-1.9081302e+04	1.4383439e+04	-1.1667727e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.1000000e+01	3.1229256e+03	-2.5480211e+04	5.6677011e+03
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.2000000e+01	-8.7561927e+03	-1.3883716e+04	2.1053209e+04
1.0000000e+01	1.0000000e+00	5.0000000e+00	0.0000000e+00	2.3000000e+01	-1.0527307e+04	1.0750958e+04	-2.1910090e+04

Figura 20. Coordenadas de satélites

Los archivos resultantes de la ejecución de script *lect_sp3.m* están guardados dentro de la carpeta SP3 que se indica en la figura 16 y poseen un nombre de nueve caracteres, los tres primeros hacen mención a las letras IGS, los siguientes dos al año, seguido de tres caracteres correspondientes al día GPS con un cero al final y es un archivo de texto donde están las coordenadas de 32 satélites de la constelación GPS a cada hora del día. Sin embargo, este archivo es un complemento para los productos generados por *list_sat.m* (Ver anexo 1, figura 4), por lo que fue necesario generar otro script denominado *union.m* (Ver anexo 1, figura 5) que permitió añadir coordenadas a la lista de satélites observados por la estación terrestre a través de una comparación en el número de satélite, obteniendo de esta manera un archivo con un nombre de doce caracteres como se muestra en la figura 21, los primeros cuatro

indican la estación seguido de dos dígitos que corresponden al año, los siguientes tres son el día GPS seguido de un cero al final y son archivos de texto.

	AÑO	MES	DÍA	HORA	# SAT	X	Y	Z
CUEC100010.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	9.000000e+00	1.4385036e+04	-1.5676368e+04	1.5209092e+04
CUEC100020.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	1.200000e+01	2.2447097e+04	-1.1391338e+04	-8.2050010e+03
CUEC100030.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	1.400000e+01	-1.4139470e+04	-2.1756295e+04	6.1092647e+03
CUEC100040.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	1.800000e+01	4.9025998e+03	-1.6458943e+04	2.0426672e+04
CUEC100050.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	2.100000e+01	3.1229256e+03	-2.5480211e+04	5.6677011e+03
CUEC100060.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	2.200000e+01	-8.7561927e+03	-1.3883716e+04	2.1053209e+04
CUEC100070.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	2.400000e+01	1.3390251e+04	-2.1534865e+04	-8.2075961e+03
CUEC100080.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	2.600000e+01	-7.1369779e+03	-2.1358572e+04	1.3153005e+04
CUEC100090.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	0.000000e+00	2.700000e+01	1.5485631e+04	-1.2039408e+04	1.8564514e+04
CUEC100100.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	1.200000e+01	2.3965621e+04	-1.0859802e+04	3.1117403e+03
CUEC100110.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	1.400000e+01	-9.8790361e+03	-1.8976344e+04	1.5958764e+04
CUEC100120.txt	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	1.800000e+01	1.2659808e+04	-1.8504815e+04	1.4200465e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	2.100000e+01	4.7150733e+03	-2.5131825e+04	-5.5461840e+03
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	2.200000e+01	2.7500601e+02	-1.7119783e+04	2.0448974e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	2.400000e+01	1.3181169e+04	-1.5522014e+04	-1.7075975e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	2.600000e+01	-5.5867368e+02	-1.6359030e+04	2.0255984e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	2.900000e+01	1.1250144e+04	-1.0671035e+04	-2.1469137e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	1.000000e+00	3.000000e+01	1.8598234e+04	-1.7638016e+04	-7.2259747e+03
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	1.200000e+01	2.1423611e+04	-7.7710077e+03	1.3585624e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	1.400000e+01	-1.9463848e+03	-1.5599091e+04	2.1568577e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	1.600000e+01	-7.6620309e+03	-1.3152323e+04	-2.1695578e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	1.800000e+01	1.6842426e+04	-1.9898889e+04	4.1454821e+03
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	2.100000e+01	6.6828081e+03	-2.0205300e+04	-1.5195677e+04
	1.000000e+01	1.000000e+00	5.000000e+00	2.000000e+00	2.200000e+01	7.2910954e+03	-2.1162881e+04	1.4400895e+04

Figura 21. Unión de coordenadas de satélites

3.3 CÁLCULO DE TEC

Para realizar el cálculo de este parámetro de la ionósfera se utilizó el software Matlab realizando un script que permita el cálculo masivo de información, el que consta de tres partes: la primera corresponde a la transformación de coordenadas (Ver anexo 1, figura 6 y 7), es decir de coordenadas cartesianas tridimensionales a geodésicas, la segunda a la aplicación del algoritmo de Klobuchar (Ver anexo 1, figura 8 y 9) y, por último el cálculo del promedio de VTEC de acuerdo al número de satélites rastreados a cada hora (Ver anexo 1, figura 10).

Como datos de entrada son necesarios: el producto del script *union.m*, los coeficientes ionosféricos que previamente fueron extraídos bajo la plataforma LINUX y las coordenadas de las estaciones terrestres las cuales fueron almacenadas en un archivo de texto con un nombre arbitrario de nueve caracteres, para todos los casos los primeros tres corresponden a F1_ seguido de dos caracteres que indican el

año de procesamiento y tres más que corresponden al día GPS más un cero adicional al final. Este archivo tiene como extensión CRD. (Ej.: F1_102560.CRD).

3.3.1 Transformación de coordenadas

Las coordenadas de los satélites que son proporcionados por los archivos sp3 se encuentran en el sistema de coordenadas rectangulares con marco de referencia IGB08 al igual que las coordenadas de las estaciones REGME, por lo tanto no hace falta transformación de marco de referencia, sin embargo para la posterior aplicación del algoritmo de Klobuchar se requiere que las coordenadas se encuentren en un sistema angular, es decir, en coordenadas geodésicas (ϕ, λ) , para lo cual se realizó la programación en Matlab con las fórmulas de transformación presentadas en el capítulo 2.

3.3.2 Algoritmo de Klobuchar

Los datos de entrada para la aplicación del algoritmo son: los coeficientes ionosféricos, las coordenadas geodésicas de la estación terrestre y de los satélites observados previamente transformados. La metodología del algoritmo calcula directamente el contenido total de electrones vertical.

El cálculo de VTEC se realizó diariamente desde el año 2010 al 2014 para cada hora del día en cuatro estaciones: CUEC, GYEC, LJEC y PTEC, dichas estaciones fueron seleccionadas porque poseen mayor abundancia de datos, es importante recalcar que el algoritmo es aplicable solamente si se tienen datos con los coeficientes ionosféricos que son imprescindibles en el modelo.

3.4 GENERACIÓN DE SERIES TEMPORALES

Para la generación de la base de datos general de cada estación se procedió a usar la plataforma LINUX con el fin de concatenar cada archivo diario de manera secuencial usando la función *cat*. Se obtuvieron cuatro archivos guardados en la carpeta SERIES y que contienen la información de los cinco años de estudio, cada archivo contiene seis columnas correspondientes a: año, mes, día, hora, día GPS y TECu como se muestra en la figura 22, sin embargo, existen filas sin información en la última columna que indican la carencia de coeficientes ionosféricos por lo que no se pudo realizar los cálculos. Las figuras 23 y 24 muestran las series temporales de TEC generadas a las 00:00 horas durante los cinco años de estudio de la estación PTEC y LJEC, como se puede apreciar la estación PTEC es la que tiene mayor carencia de datos en comparación a la estación LJEC.

AÑO	MES	DÍA	HORA	DÍA GPS	TECu
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	0.0000000e+00	1.0000000e+00	1.7995783e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.6573678e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	2.0000000e+00	1.0000000e+00	1.4637226e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	3.0000000e+00	1.0000000e+00	1.3760151e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	4.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2884960e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	5.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2691837e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	6.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2685488e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	7.0000000e+00	1.0000000e+00	1.1812984e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	8.0000000e+00	1.0000000e+00	1.3136458e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	9.0000000e+00	1.0000000e+00	1.1077138e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.1802775e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.1000000e+01	1.0000000e+00	1.1351128e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.2000000e+01	1.0000000e+00	1.1016847e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.3000000e+01	1.0000000e+00	1.1866002e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.4000000e+01	1.0000000e+00	1.6238048e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.5000000e+01	1.0000000e+00	1.8295638e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.6000000e+01	1.0000000e+00	2.2797687e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.7000000e+01	1.0000000e+00	2.7355850e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.8000000e+01	1.0000000e+00	2.7449096e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	1.9000000e+01	1.0000000e+00	2.8522217e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	2.0000000e+01	1.0000000e+00	2.9822361e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	2.1000000e+01	1.0000000e+00	3.0579054e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	2.2000000e+01	1.0000000e+00	2.5804952e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	1.0000000e+00	2.3000000e+01	1.0000000e+00	3.0340002e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	0.0000000e+00	2.0000000e+00	1.7933379e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	1.0000000e+00	2.0000000e+00	1.6695330e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	2.0000000e+00	2.0000000e+00	1.4471244e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	3.0000000e+00	2.0000000e+00	1.3637948e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	4.0000000e+00	2.0000000e+00	1.2931180e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	5.0000000e+00	2.0000000e+00	1.2704783e+01
1.0000000e+01	1.0000000e+00	2.0000000e+00	6.0000000e+00	2.0000000e+00	1.2627605e+01

Figura 22. Ejemplo de la base de datos de la estación GYEC

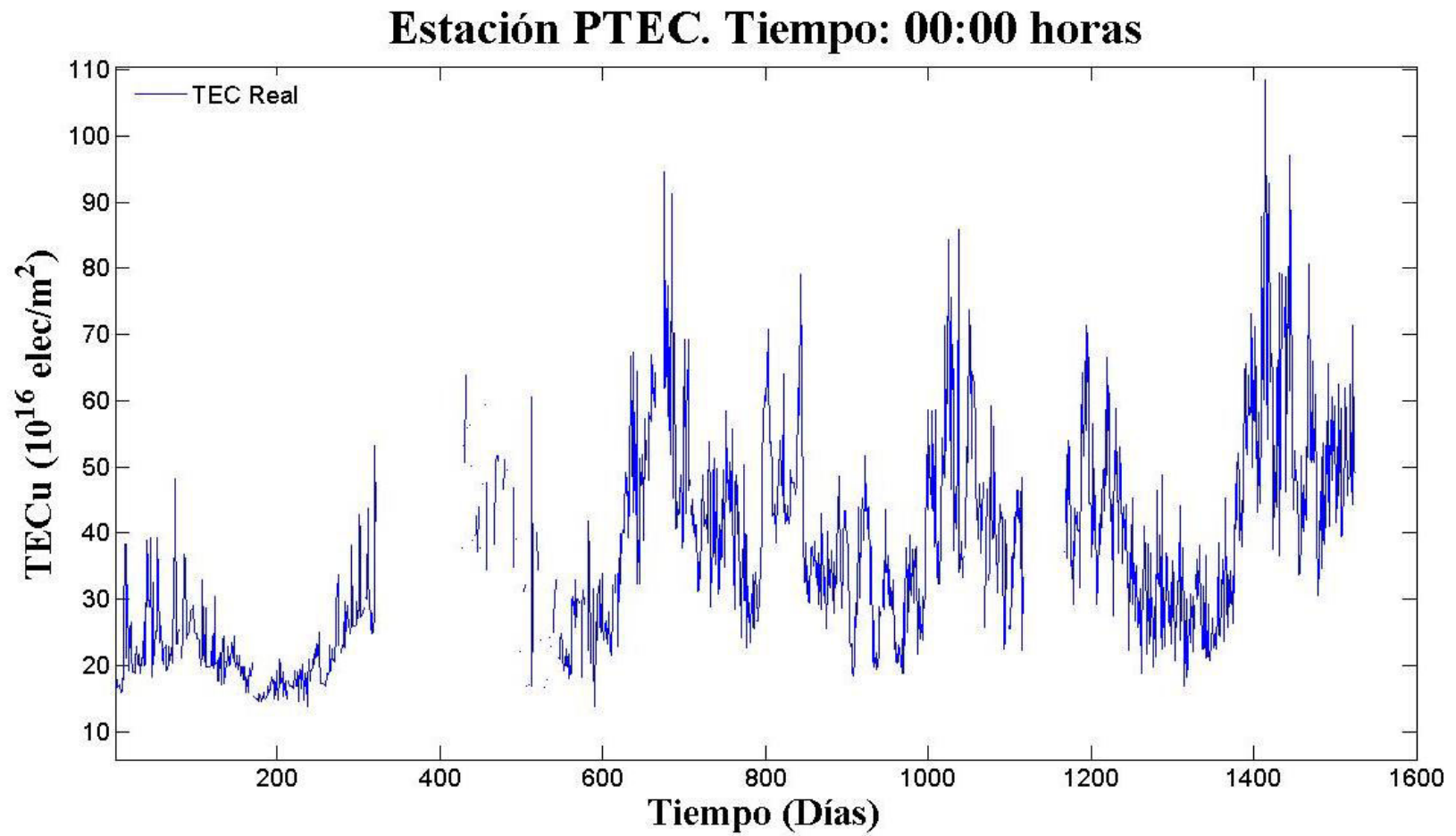


Figura 23. Serie temporal. Estación PTEC. Tiempo 00:00 horas.

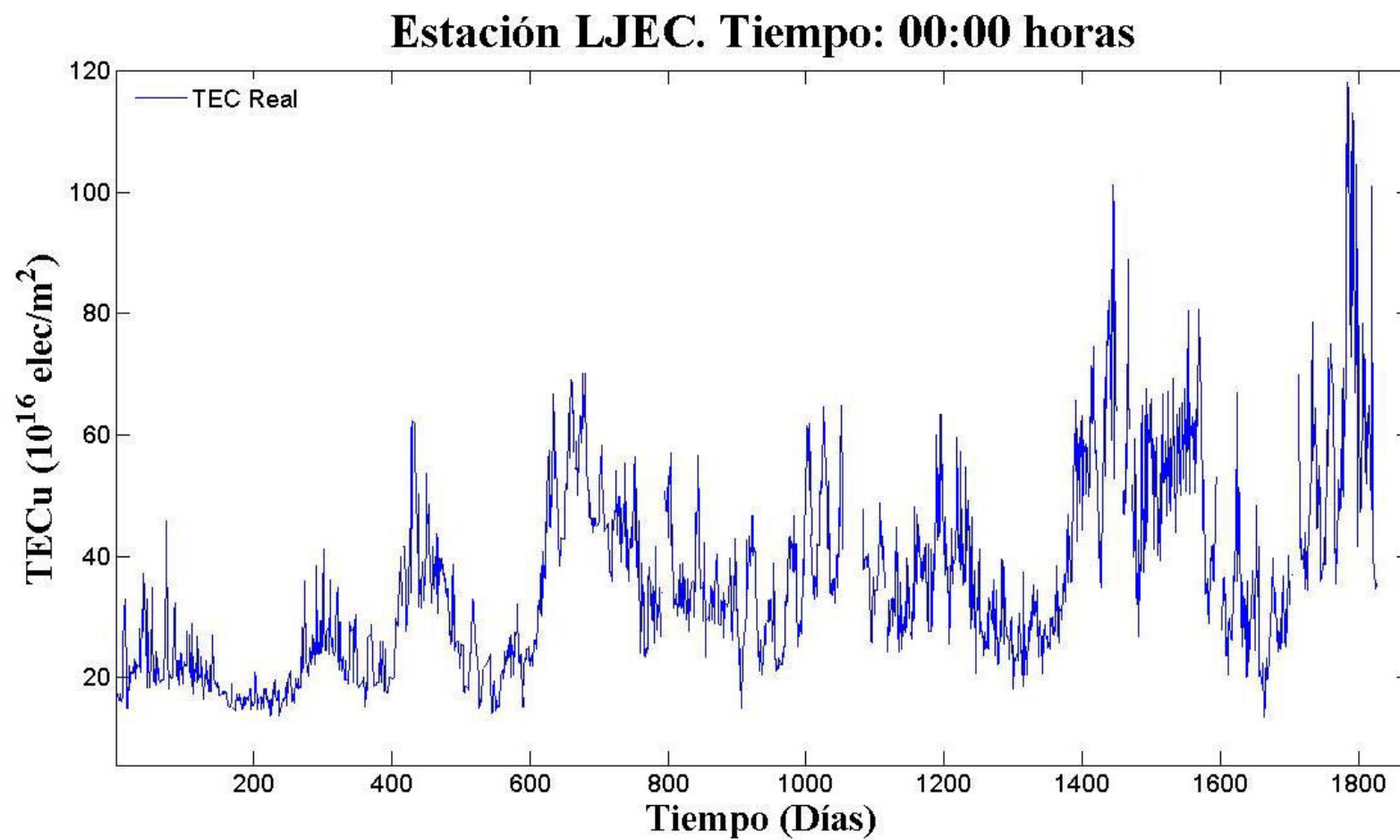


Figura 24. Serie temporal. Estación LJEC. Tiempo 00:00 horas.

Para validar los resultados obtenidos con el algoritmo de Klobuchar se tomó como referencia los mapas interpolados que ofrece la Universidad Nacional de La Plata, Centro de Análisis Ionosférico de SIRGAS, disponible bajo la siguiente dirección <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>, que se encuentran comprimidos y son mapas de cada hora del día facilitando la comparación con los resultados obtenidos.

En la figura 25, se muestra un mapa interpolado de VTEC para Latinoamérica a las 00:00 horas del día 319 del año 2013, donde la escala de TECu oscila entre 0 y 80, en el caso de Ecuador se aprecia que los valores de TECu son elevados a comparación del resto presentando valores de 60 a 70 TECu. Los valores obtenidos con esta metodología se contrastaron con este modelo en la estación GYEC, en el mismo día y tiempo. La figura 26, muestra gráficamente el valor de TECu en la estación donde se observa que los valores obtenidos por ambas metodologías son similares.

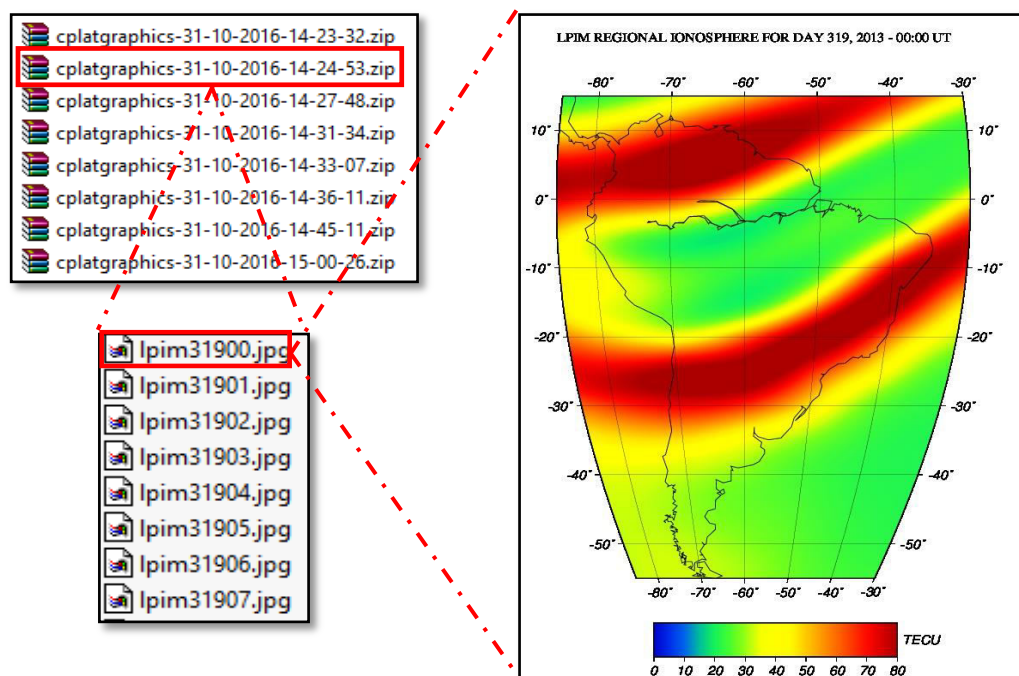


Figura 25. Mapa Regional de VTEC

Fuente: (Universidad de la Plata, 2011)

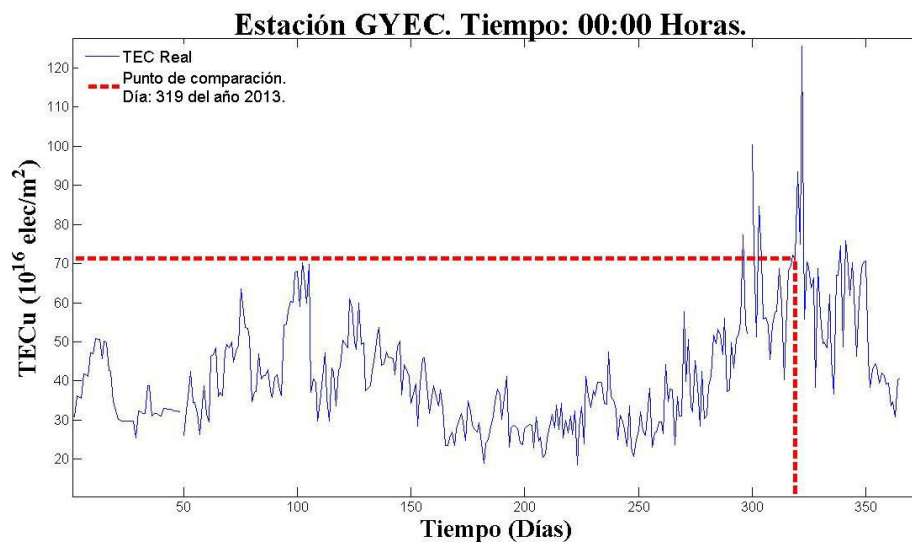


Figura 26. Serie temporal del año 2013. Estación GYEC

La figura 27, muestra un análisis diferente en el comportamiento ionosférico para ello se colocó secuencialmente los valores de VTEC de todas las horas para el mes de Enero del 2010 de la estación LJEC, es decir, no se filtró los datos por horas mostrando un comportamiento exactamente sinusoidal de la variable TEC a lo largo del tiempo.

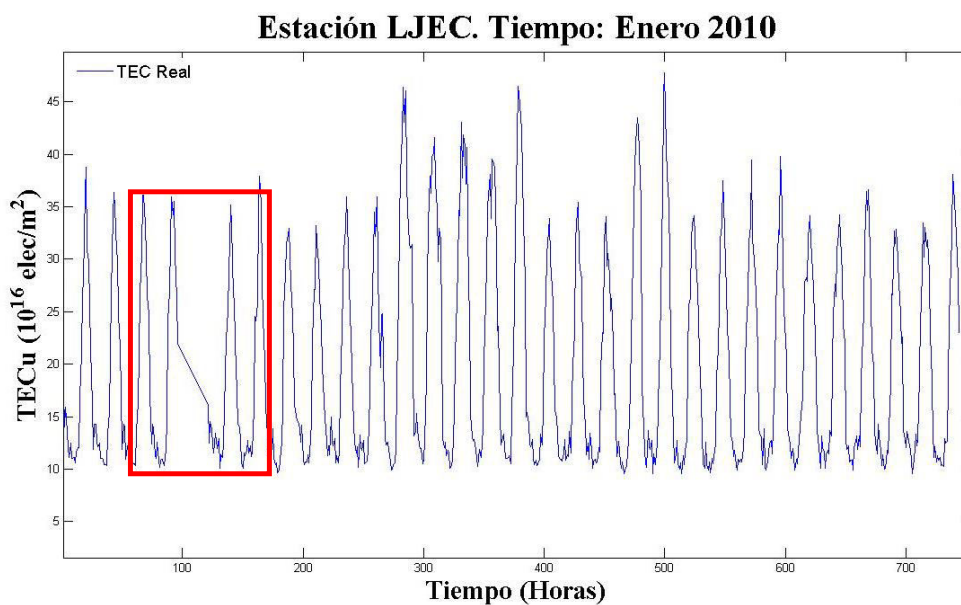


Figura 27. Estación LJEC. Enero 2010.

El recuadro de la figura 27 indica la carencia de datos de un día completo haciendo que la serie pierda su continuidad, el objetivo de esta serie temporal es mostrar que el comportamiento diario de TEC para las estaciones analizadas cumple la teoría propuesta por Klobuchar que está ajustada de la función positiva del coseno como se mostró en la figura 8.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 GENERACIÓN DE MODELOS

La base de datos contiene la información de VTEC de las cuatro estaciones seleccionadas, para el análisis estadístico se escogió la estación con más datos durante el período de estudio con el fin de que el modelo matemático se ajuste de mejor manera, la estación LJEC fue la que menor carencia de datos tiene, cabe recalcar que la metodología para el análisis de tendencia, estacionalidad y estacionaridad es estándar.

El primer análisis que se realizó fue la eliminación de los valores atípicos con ayuda del rango intercuartil, para ello se sacó el valor de cada cuartil en una hoja de cálculo de Excel con la función *CUARTIL.EXC*, posteriormente, se obtuvo el límite superior e inferior de los valores atípicos con las siguientes fórmulas:

$$lim_{inf} = Q_1 - 3 \cdot RIQ \quad (4.1)$$

$$lim_{sup} = Q_3 + 3 \cdot RIQ \quad (4.2)$$

Donde:

$$RIQ = Q_3 - Q_1;$$

Q_3 : Tercer cuartil del total de datos

Q_1 : Primer cuartil del total de datos

El valor de 3 se usa para eliminar valores atípicos extremos, para el caso de VTEC se debe suprimir un número mínimo de valores debido a que la pérdida masiva de datos afecta a la precisión de ajuste del modelo matemático.

La tabla 2, muestra el porcentaje de valores eliminados, la mitad de las horas no presentaron valores atípicos donde la hora 11:00 tuvo el mayor porcentaje de eliminación de datos. Durante este análisis la hora 04:00 presentaba alrededor de 60 datos atípicos; pero, eliminar esa cantidad de datos afecta el valor de los periodos fundamentales que modelan la serie, razón por la cual se optó por dejar todos los valores dentro de esta serie. Los valores atípicos pueden ser resultados de emisiones puntuales fuertes de energía a cada hora.

Tabla 2.

Porcentaje de valores atípicos eliminados

Hora	Observaciones	Valores atípicos	Porcentaje de eliminación	Hora	Observaciones	Valores atípicos	Porcentaje de eliminación
00:00	1742	00	0,00	12:00	1748	00	0,00
01:00	1748	00	0,00	13:00	1747	00	0,00
02:00	1748	10	0,57	14:00	1742	00	0,00
03:00	1749	17	0,97	15:00	1742	00	0,00
04:00	1745	00	0,00	16:00	1743	00	0,00
05:00	1748	14	0,80	17:00	1742	00	0,00
06:00	1748	09	0,51	18:00	1743	00	0,00
07:00	1747	09	0,52	19:00	1745	00	0,00
08:00	1748	11	0,63	20:00	1745	00	0,00
09:00	1745	08	0,46	21:00	1744	00	0,00
10:00	1746	14	0,80	22:00	1745	07	0,40
11:00	1746	21	1,20	23:00	1744	07	0,40

4.1.1. Análisis de tendencia

Concluida la depuración de datos el primer parámetro que se analizó fue la tendencia de las series a cada hora a través de una regresión lineal, la tendencia corresponde a la dirección ascendente o descendente que toma la variable en el periodo de estudio. La tabla 3, muestra los valores obtenidos para la regresión lineal de los datos, los parámetros corresponden a la ecuación (2.29). No existe un criterio establecido para definir desde qué valor de pendiente existe tendencia en una serie, por lo que queda a criterio del investigador, se podría considerar que existe tendencia en la serie a partir de valores de pendiente mayores a 0,01 sin embargo, una vez obtenido el análisis completo de las series se podrían aplicar pruebas estadísticas que sustenten la presencia de este componente.

Con el criterio establecido (pendiente $> 0,01$) las horas de la tarde y noche, específicamente desde las 13:00 hasta las 02:00 horas, presentan una pendiente leve creciente que podría ser considerada para ajustar la precisión del modelo a los datos reales, sin embargo la pendiente de las horas de la noche y de la mañana, de 03:00 a 12:00 horas, tienen valores muy cercanas a cero, cabe recalcar que esta componente será validada con pruebas estadísticas para un mejor ajuste de los modelos matemáticos para las series. La variación de la tendencia está relacionada con el ciclo solar número 24 que empieza en el año 2009 afectando a los valores del contenido total de electrones por el aumento de manchas solares.

Según el análisis de tendencia las horas de la tarde y de la noche son las más susceptibles al cambio en el ciclo solar en la región (Ver anexo 2). El cambio de la tendencia se da a principios del año 2013 que es cuando el sol está alcanzando su máximo solar.

Tabla 3.**Coefficientes de la regresión lineal**

Hora	γ_0	γ_1	Hora	γ_0	γ_1
0:00	21,04	0,016	12:00	12,26	0,009
1:00	15,80	0,015	13:00	14,60	0,013
2:00	12,90	0,011	14:00	19,35	0,015
3:00	11,81	0,006	15:00	24,36	0,016
4:00	11,70	0,002	16:00	29,09	0,017
5:00	12,33	0,001	17:00	32,93	0,017
6:00	12,34	0,000	18:00	35,27	0,017
7:00	12,43	0,000	19:00	35,87	0,018
8:00	12,4	0,000	20:00	35,40	0,018
9:00	12,33	0,000	21:00	33,32	0,018
10:00	12,10	0,001	22:00	30,04	0,018
11:00	11,98	0,004	23:00	26,09	0,017

4.1.2. Análisis de estacionaridad

Este análisis se realiza en base al resultado obtenido en la tendencia, de manera específica en el valor de la pendiente obtenida, si dicho valor se aproxima a cero se dice que la serie es estacionaria con una media constante caso contrario si la serie presenta tendencia es no estacionaria.

En la tabla 3, se muestra que las series que más se aproximan a cero corresponden a las horas de 03:00 a 12:00 que podrían ser tratadas como series estacionarias mientras que las horas de 13:00 a 02:00 presentan un crecimiento leve respecto a su media por lo que pueden considerarse como series no estacionarias, esto es notorio según el ajuste que tenga el modelo con su componente estacional a los datos reales que se analizará más adelante. Las figuras 28 y 29 muestran las horas con mayor y menor pendiente de la estación en estudio.

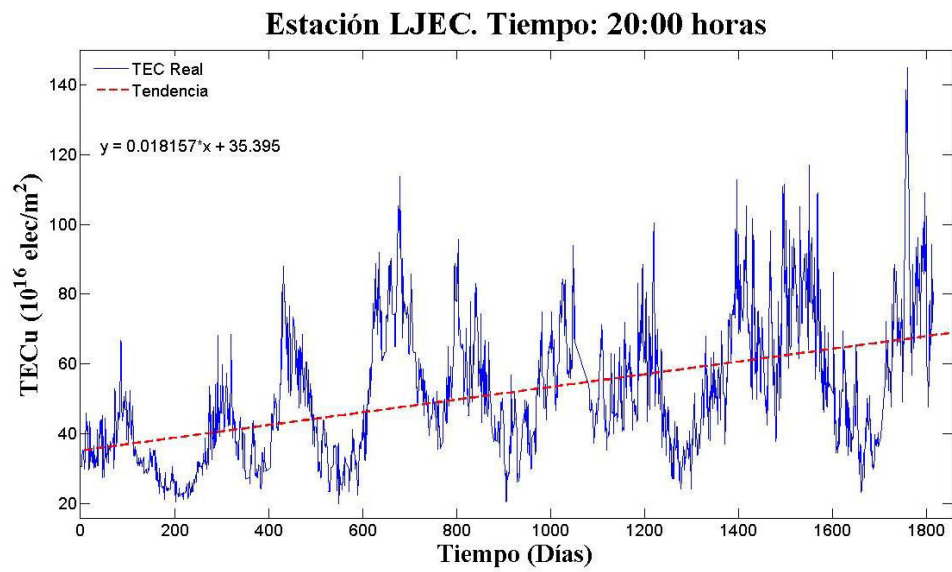


Figura 28. Serie no estacionaria. Tiempo 20:00 horas

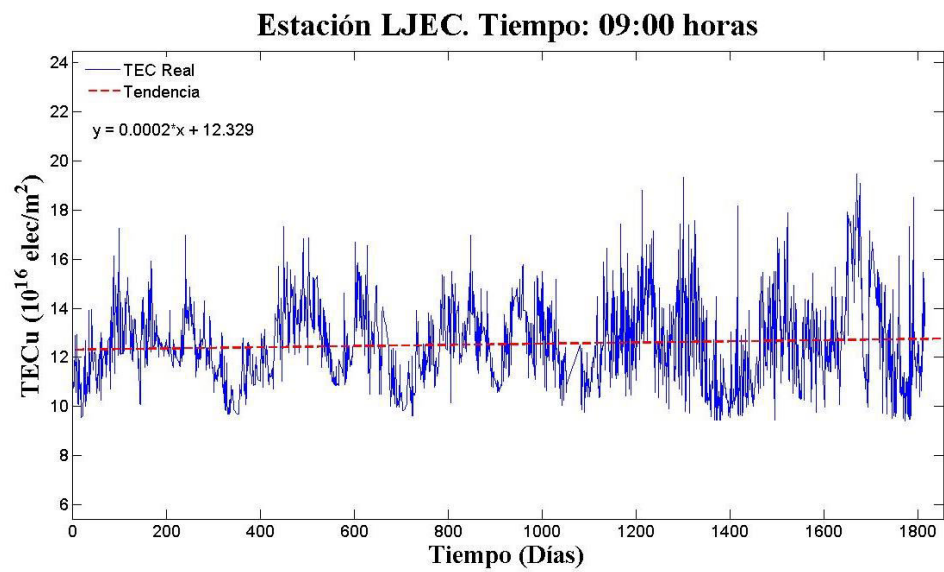


Figura 29. Serie estacionaria. Tiempo 09:00 horas

El valor de pendiente obtenido en la regresión lineal de la serie temporal del mes de Enero del 2010 fue de 0,0014 es decir menor a 0,01 por tal fue considerada como una serie estacionaria.

4.1.3. Análisis de estacionalidad

El primer paso para este análisis fue determinar los periodos o frecuencias fundamentales de cada serie de tiempo por hora para lo cual se realizó un script en Matlab, denominado *periodo.m* (Ver anexo 1, figura 11), aplicando la función de periodograma de la ecuación (2.43), el resultado de este script son cuatro columnas que indican la frecuencia, el valor de periodograma ordenado de manera descendente que representa la importancia del periodo, τ que es una variable introducida al modelo y el período fundamental. La figura 30, muestra el resultado de la ejecución del script, los valores enmarcados por el recuadro rojo son los importantes al momento de obtener el modelo matemático.

Frecuencia	Periodograma	τ	Periodo fundamental
1.1013216e-03	3.4768138e+04	-5.0371031e+01	9.0800000e+02
5.5066079e-04	2.0742949e+04	3.4352317e+01	1.8160000e+03
5.5066079e-03	1.9138227e+04	-2.0852879e+01	1.8160000e+02
3.8546256e-03	1.7552339e+04	2.5587688e+01	2.5942857e+02
3.3039648e-03	5.6890452e+03	1.5135050e+01	3.0266667e+02
1.7070485e-02	4.2419772e+03	-5.0670711e+00	5.8580645e+01
8.2599119e-03	3.1707143e+03	3.1105718e+00	1.2106667e+02
4.4052863e-03	3.1554167e+03	6.9859264e+00	2.2700000e+02
7.7092511e-03	3.0581103e+03	-3.7534252e+00	1.2971429e+02
8.8105727e-03	2.7087253e+03	-5.1653202e+00	1.1350000e+02
1.3215859e-02	2.6613626e+03	6.9769501e+00	7.5666667e+01
4.0748899e-02	2.5768673e+03	-2.6290669e+00	2.4540541e+01
1.0462555e-02	2.1813447e+03	-2.0805402e+00	9.5578947e+01
9.3612335e-03	2.1185851e+03	-1.5008767e+00	1.0682353e+02
3.6894273e-02	2.0526565e+03	1.1530466e+00	2.7104478e+01
1.1013216e-02	1.8319711e+03	-1.8152677e+00	9.0800000e+01
2.0925110e-02	1.6866725e+03	-3.2748018e-01	4.7789474e+01
1.5969163e-02	1.6721051e+03	-6.3257461e+00	6.2620690e+01
2.4779736e-02	1.6233986e+03	-2.8196170e+00	4.0355556e+01
3.3039648e-02	1.5834741e+03	2.6526309e+00	3.0266667e+01

Figura 30. Periodos fundamentales obtenidos de la serie temporal LJEC. Tiempo: 00:00 horas

La figura 31, muestra la gráfica del cálculo de periodograma para todas las frecuencias en un rango de 0 a 1, siendo simétrica a partir de la frecuencia 0.5, cabe mencionar que esta frecuencia se la conoce como *Nyquist*. Por tal razón, no es relevante analizar estas gráficas para todos los valores de frecuencias sino solo hasta dicho valor.

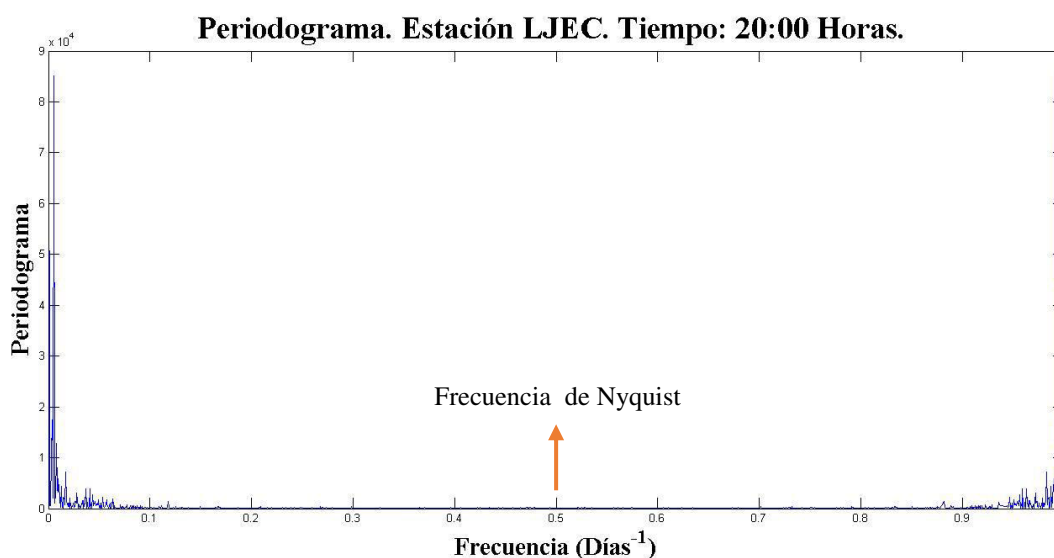


Figura 31. Periodograma completo de la estación LJEC. Tiempo: 20:00 horas

Los nueve valores enmarcados son los que se considerarán para el modelo matemático de las series, para ello se realizó otro script en Matlab llamado *estacional.m* (Ver anexo 1, figura 12), cuyo objetivo es determinar los amplitudes desconocidas \hat{A}_j y \hat{B}_j en base a los valores de VTEC y tiempo. Adicionalmente, se requiere los valores de las frecuencias fundamentales obtenidas en el script anterior. Para obtener un mejor ajuste se debería ocupar todos los periodos fundamentales; pero, la ecuación que representaría el modelo estacional sería muy complejo por lo que es recomendable usar hasta tres periodos. Los periodos elegidos corresponden a los que tienen mayor valor de periodograma que se puede apreciar en la figura 32

para las 20:00 horas donde se observa que el eje de las ordenadas corresponde al valor de periodograma obtenido mientras que el eje de las abscisas muestra la frecuencia con el tiempo en días⁻¹, los valores de periodo (p) mostrados indican los períodos más altos y considerados al modelo, cabe mencionar que el periodo es inversa a la frecuencia. Para la selección de los periodos fundamentales se observaron las dos frecuencias con valores de periodogramas más altos y un tercero que minimice el error cuadrático medio o RMS general del modelo ajustado a las series temporales. Los valores de \hat{A}_j y \hat{B}_j se extrajeron en otro archivo para obtener las diferentes amplitudes de los modelos matemáticos de Fourier.

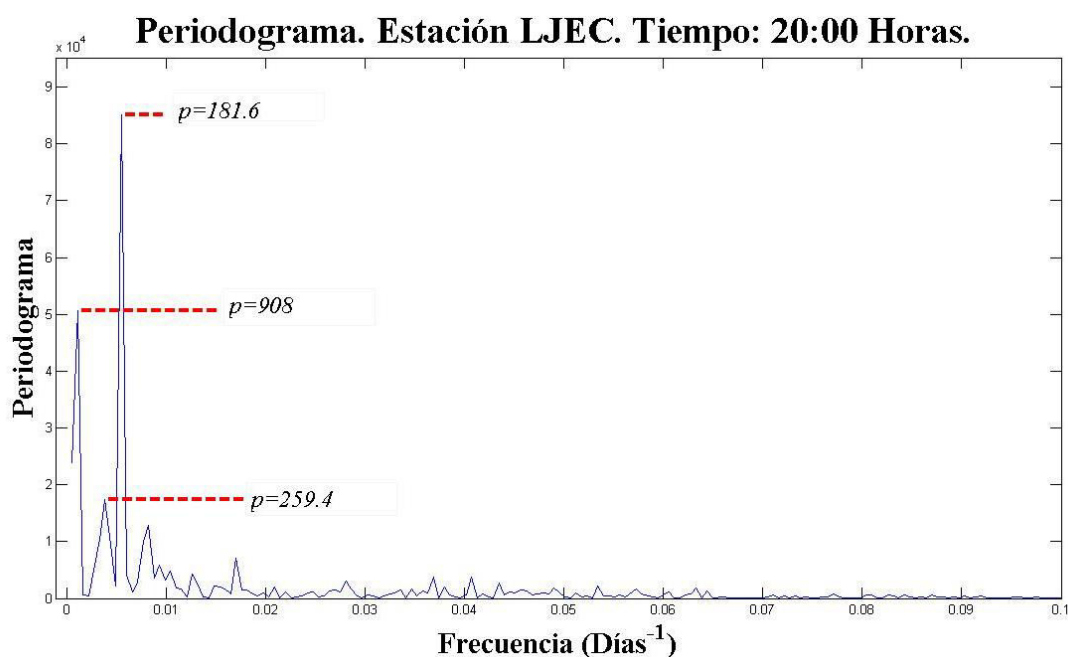


Figura 32. Periodograma. Estación LJEC. Tiempo: 20:00 horas

La tabla 4, muestra los periodos seleccionados para el modelamiento matemático como se observa los dos primeros periodos, en colores celeste y naranja, fueron ocupados para las 24 series y el tercer periodo, en color verde, fue seleccionado de

acuerdo al menor RMS que generaba, de los nueve periodos seleccionados al principio solo se usaron los cinco primeros, como el tiempo de observación fue diario el periodo corresponde a la misma unidad (días).

Tabla 4.

Periodos fundamentales seleccionados y RMS.

Hora	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	RMS
00:00	908,00	1816,00	181,60	259,43	302,67	11,86
01:00	908,00	259,43	181,60	1816,00	302,67	10,83
02:00	907,00	259,14	181,40	1814,00	302,33	8,63
03:00	907,00	181,40	259,14	1814,00	58,52	6,04
04:00	907,00	181,40	302,33	259,14	106,70	3,43
05:00	302,33	129,57	201,55	106,71	90,70	2,00
06:00	129,71	302,67	201,78	121,06	165,09	1,88
07:00	129,71	165,09	181,60	302,67	53,41	1,84
08:00	181,60	129,71	165,09	64,86	35,61	1,79
09:00	181,60	129,71	165,09	302,67	259,43	1,75
10:00	129,43	164,73	302,00	53,29	181,20	1,98
11:00	906,00	258,86	120,80	302,00	129,43	4,04
12:00	908,00	259,43	1816,00	181,60	121,07	7,74
13:00	908,00	259,43	1816,00	181,60	121,07	10,28
14:00	908,00	181,60	1816,00	259,43	121,07	12,03
15:00	908,00	181,60	1816,00	259,43	227,00	13,14
16:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	227,00	13,73
17:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	129,71	14,06
18:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	129,71	14,55
19:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	129,71	14,77
20:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	121,07	14,97
21:00	181,60	908,00	1816,00	259,43	121,07	14,46
22:00	181,00	905,00	1810,00	258,57	120,67	13,77
23:00	905,00	181,00	1810,00	258,57	301,67	13,28

Los modelos desde las 03:00 horas hasta las 12:00 horas presentan un RMS menor a 10 que corresponden a las series sin tendencia. Los dos primeros periodos son los más representativos y el valor de cada periodo tiende a repetirse en diferentes horas, por ejemplo, 908 días corresponden a 2,5 años y está presente en el primer y segundo periodo fundamental con un 45,8 % y 29,2% respectivamente de las 24 series del día, es decir que pasado este tiempo el comportamiento de TEC es el mismo y es un valor que se presenta en horas de la mañana y noche. La tabla 5, muestra los valores de los tres periodos seleccionados para los modelos matemáticos junto con su porcentaje de reiteración y su valor correspondiente en años.

Tabla 5.

Porcentajes de reiteración de periodos fundamentales.

Primer Período fundamental en días	Primer Período fundamental en años	Horas	Porcentaje de reiteración
908	2,50	(23:00-04:00) (11:00-15:00)	45,80
182	0,50	(08:00,09:00) (16:00-22:00)	37,50
130	0,40	(06:00,07:00)	8,40
302	0,80	(05:00)	4,20
Segundo Período fundamental en días	Segundo Período fundamental en años	Horas	Porcentaje de reiteración
908	2,50	16:00-22:00	29,20
182	0,50	03:00,04:00,14:00,15:00,23:00	20,90
130	0,40	(05:00, 08:00, 09:00)	12,50
303	0,80	(06:00)	4,20
259	0,70	(01:00, 02:00) (11:00-13:00)	20,90
164	0,40	(07:00, 10:00)	8,30
1816	5,00	(00:00)	4,20
Tercer Período fundamental en días	Tercer Período fundamental en años	Horas	Porcentaje de reiteración
259	0,70	(00:00,04:00, 09:00, 14:00-23:00)	54,20
181	0,50	(07:00,10:00,12:00,13:00)	16,70

CONTINÚA →

165	0,50	(08:00)	4,20
120	0,30	(06:00,11:00)	8,30
1816	4,50	(01:00-03:00)	12,50
202	0,60	(05:00)	4,20

En el análisis de estacionalidad para el mes de enero del 2010 dio como resultados los siguientes periodos fundamentales cuya unidad es la hora. Como se observa en la tabla 6 el primer periodo corresponde a un día y es un valor lógico debido a que el cálculo de TEC se realizó en base al algoritmo de Klobuchar el cual toma el comportamiento de una onda sinusoidal del coseno para cada día durante la estimación de TEC lo que se corrobora en el comportamiento de su serie de tiempo.

Tabla 6.

Periodos fundamentales de Enero 2010

Tiempo	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Enero	24,00	12,00	744,00

4.2 MODELAMIENTO DE LAS SERIES DE TIEMPO

Una vez analizado las componentes de tendencia, estacionaridad y estacionalidad se puede representar matemáticamente cada serie de tiempo acorde a la ecuación (2.30). Estos modelos matemáticos pueden variar de acuerdo al comportamiento de su tendencia debido a que esta componente puede contribuir a un mejor ajuste a los datos cuyos modelos quedarían definidos por las ecuaciones (4.3) en caso de que la serie tenga tendencia y (4.4) en que la serie sea estacionaria o sin tendencia.

$$z_t = \gamma_0 + \gamma_1 t + \sum_{n=1}^3 \hat{A}'_n \sin\left(\frac{2\pi t}{f_n}\right) + \sum_{n=1}^3 \hat{B}'_n \cos\left(\frac{2\pi t}{f_n}\right) \quad (4.3)$$

Donde:

γ_1 : Es la pendiente de la recta

γ_0 : Es la intersección con el eje y

n : Es el número de periodo fundamental seleccionado para cada hora.

$$z_t = \mu_t + \sum_{n=1}^3 \hat{A}'_n \sin\left(\frac{2\pi t}{f_n}\right) + \sum_{n=1}^3 \hat{B}'_n \cos\left(\frac{2\pi t}{f_n}\right) \quad (4.4)$$

Donde:

μ_t : Es el valor de la media para cada serie.

La interrogante al problema de la tendencia radica en saber qué horas deberían tener a esta componente dentro de su modelamiento para un mejor ajuste, para lo cual se realizó una prueba de varianzas, aplicando el método de *Fisher-Snedecor* o prueba F, donde las poblaciones fueron: las observaciones ajustadas a un modelo matemático sin tendencia y a un modelo con tendencia para cada hora, con lo cual se obtuvieron muestras de estas poblaciones finitas de acuerdo con la ecuación (4.5)

$$m = \frac{M \cdot Z_{s/2}^2 \cdot p \cdot q}{M \cdot \varepsilon^2 + Z_{s/2}^2 \cdot p \cdot q} \quad (4.5)$$

Donde:

m : Es el tamaño de la muestra

M : Es el tamaño de la población finita

p : Es la proporción de éxitos en una muestra aleatoria, para este caso se tomó el valor de 0,5 (50%) con el fin de maximizar el tamaño muestral.

$$q = 1 - p$$

$Z_{s/2}$: Es el valor de la distribución normal que deja un área de $s/2$ a la derecha

s : Es el nivel de confianza este caso 95%

ε : Es el nivel de error dispuesto a cometer

El resultado para todas las horas fue un tamaño muestral de 315 datos, los cuales fueron seleccionados aleatoriamente usando la función *aleatorio()* de la hoja de cálculo Excel, una vez extraídos los valores se calculó la media y la varianza muestral, siendo la última el parámetro de contraste para la prueba de Fisher. Para determinar si la tendencia mejora el modelo se deben seguir 4 pasos:

- Plantear las hipótesis nula y alternativa
- Determinar el nivel de significancia ($\delta = 0,05$)
- Aplicar la prueba F
- Decisión

La tabla 7, muestra los valores de la varianza muestral obtenidas según las dos opciones del modelamiento de series para las 24 horas del día.

Tabla 7.

Varianzas muestrales de dos poblaciones (con y sin tendencia)

Hora	Varianza de muestra con tendencia	Varianza de muestra sin tendencia	Hora	Varianza de muestra con tendencia	Varianza de muestra sin tendencia
00:00	267,18	82,77	12:00	67,86	32,18
01:00	223,20	67,82	13:00	139,48	52,64
02:00	118,45	36,38	14:00	206,05	84,68
03:00	41,12	14,70	15:00	257,60	112,38
04:00	7,69	3,60	16:00	296,22	132,92
05:00	0,99	0,90	17:00	310,53	152,73
06:00	1,08	1,02	18:00	356,73	175,06
07:00	0,91	0,89	19:00	342,45	166,88
08:00	0,85	0,82	20:00	340,77	166,88
09:00	0,92	0,89	21:00	316,62	160,59
10:00	1,54	1,23	22:00	267,97	126,27
11:00	13,76	4,76	23:00	260,25	110,04

CONTINÚA →

De este modo, el planteamiento de las hipótesis quedaría establecido por:

$$H_0(\text{hipótesis nula}) \rightarrow \sigma_{ct}^2 \geq \sigma_{st}^2$$

$$H_a(\text{hipotesis alternativa}) \rightarrow \sigma_{ct}^2 < \sigma_{st}^2$$

La prueba F será de cola izquierda debido a que se desea comprobar que la varianza de los modelos con tendencia es menor a los modelos sin tendencia. Por lo tanto, se estableció un nivel de confianza al 95% con un nivel de significancia de 5% que corresponde a un área de 0,83 u² según las tablas de Fisher que será contrastado al valor calculado según la ecuación (4.6) de la prueba F.

$$F = \frac{\sigma_{st}^2}{\sigma_{ct}^2} \quad (4.6)$$

A manera de ejemplo se realizó la prueba para las 08:00 horas, el valor calculado de F es 0,96 que se contrasta con el valor de la tabla de Fisher como se muestra en la figura 33.

$$F = \frac{0,82}{0,85}$$

$$F = 0,96$$

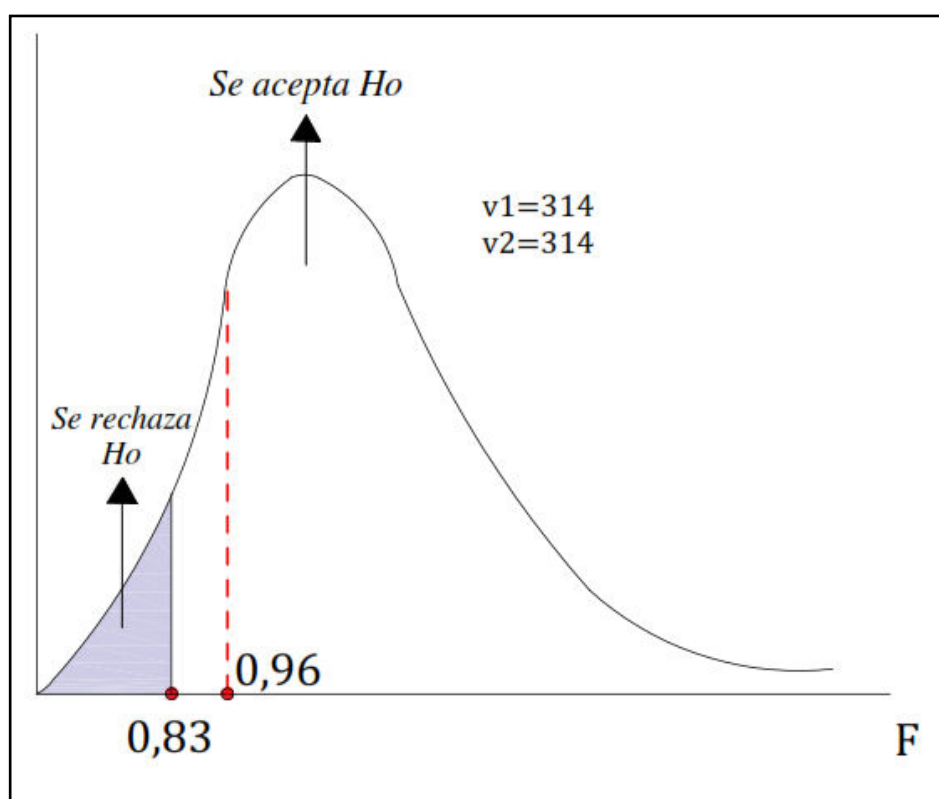


Figura 33. Región crítica para la Hipótesis alternativa $\sigma_{ct}^2 < \sigma_{st}^2$

La decisión para este caso es que al nivel de significancia del 5% no se rechaza la hipótesis nula, es decir, la tendencia no mejora el modelo matemático. La tabla 8, muestra el valor de F según la tabla de Fisher con un nivel de significancia de 5% con 314 grados de libertad para las dos muestras, además los valores de F calculados y la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula.

Tabla 8.

Valores de la prueba de F obtenidos

HORAS	GRADOS DE LIBERTAD (n-1)	NIVEL DE SIGNIFICANCIA: 0,05	F (COLA IZQUIERDA)	DECISIÓN
00:00	314	0,83	0,31	Se rechaza la Ho
01:00	314	0,83	0,30	Se rechaza la Ho
02:00	314	0,83	0,31	Se rechaza la Ho
03:00	314	0,83	0,36	Se rechaza la Ho
04:00	314	0,83	0,47	Se rechaza la Ho
05:00	314	0,83	0,91	Se acepta la Ho
06:00	314	0,83	0,94	Se acepta la Ho
07:00	314	0,83	0,98	Se acepta la Ho
08:00	314	0,83	0,96	Se acepta la Ho
09:00	314	0,83	0,97	Se acepta la Ho
10:00	314	0,83	0,80	Se rechaza la Ho
11:00	314	0,83	0,35	Se rechaza la Ho
12:00	314	0,83	0,47	Se rechaza la Ho
13:00	314	0,83	0,38	Se rechaza la Ho
14:00	314	0,83	0,41	Se rechaza la Ho
15:00	314	0,83	0,44	Se rechaza la Ho
16:00	314	0,83	0,45	Se rechaza la Ho
17:00	314	0,83	0,49	Se rechaza la Ho
18:00	314	0,83	0,49	Se rechaza la Ho
19:00	314	0,83	0,49	Se rechaza la Ho
20:00	314	0,83	0,54	Se rechaza la Ho
21:00	314	0,83	0,51	Se rechaza la Ho
22:00	314	0,83	0,42	Se rechaza la Ho
23:00	314	0,83	0,42	Se rechaza la Ho

■ Modelos matemáticos que aceptan la tendencia

■ Modelos matemáticos que rechazan la tendencia

La tabla 8, indica que de 05:00 a 09:00 horas las series son estacionarias, es decir, para su modelo matemático se puede utilizar la media más el componente estacional como indica la ecuación (4.4) y para las horas restantes sombreadas con color verde es necesario considerar la ecuación de su tendencia más el componente estacional como indica la ecuación (4.3). Este análisis da certeza a cómo quedan establecidos

los modelos matemáticos. Las ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.9) representan los modelos de ejemplo para series con y sin tendencia.

- **Modelo matemático con tendencia. Tiempo 20:00 horas**

$$z_t = 35,395 + 0,0182 \cdot t - 8,48 \sin\left(\frac{2\pi t}{181,6}\right) - 11,33 \cos\left(\frac{2\pi t}{181,6}\right) - 10,70 \sin\left(\frac{2\pi t}{908}\right) - 99,22 \cos\left(\frac{2\pi t}{908}\right) - 6,34 \sin\left(\frac{2\pi t}{259,4}\right) - 40,98 \cos\left(\frac{2\pi t}{259,4}\right) \quad (4.7)$$

- **Modelo matemático sin tendencia. Tiempo 09:00 horas**

$$z_t = 12,55 + 40,82 \sin\left(\frac{2\pi t}{181,6}\right) - 82,35 \cos\left(\frac{2\pi t}{181,6}\right) - 88,70 \sin\left(\frac{2\pi t}{129,7}\right) - 10,02 \cos\left(\frac{2\pi t}{129,7}\right) - 59,70 \sin\left(\frac{2\pi t}{259,4}\right) - 636,04 \cos\left(\frac{2\pi t}{259,4}\right) \quad (4.8)$$

$$z_t = 19,85 - 10,24 \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + 6,67 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) - 3,29 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right) - 6,67 \cos\left(\frac{2\pi t}{12}\right) - 0,98 \sin\left(\frac{2\pi t}{744}\right) - 2,23 \cos\left(\frac{2\pi t}{744}\right) \quad (4.9)$$

- **Modelo matemático sin tendencia. Tiempo Enero 2010**

Los modelos matemáticos restantes obtenidos para todas las horas se muestran en el anexo 3, mientras que sus representaciones gráficas en el anexo 4. Las figuras 34, 35 y 36 ejemplifican a las ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.9):

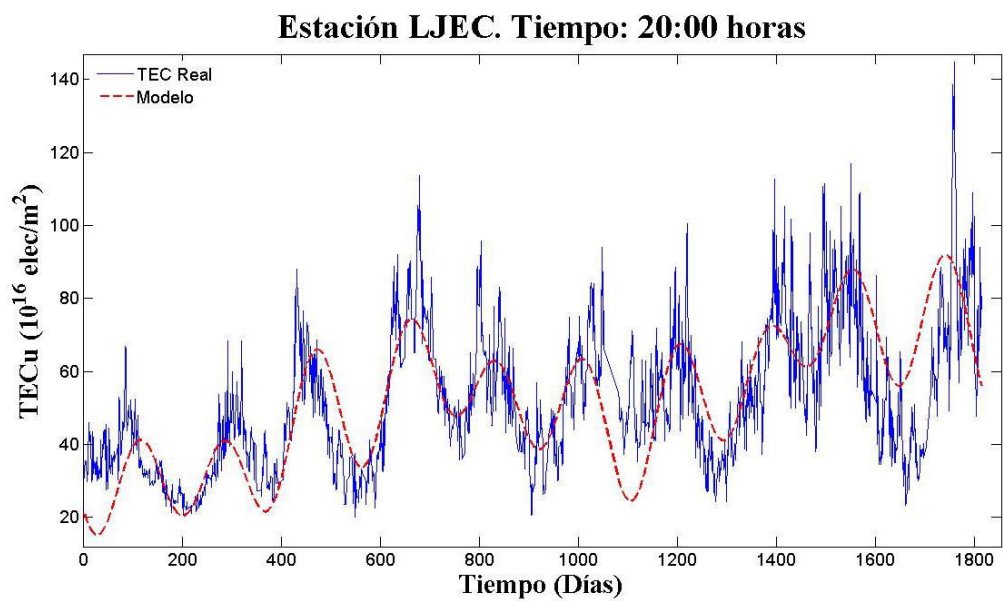


Figura 34. Gráfica del modelo matemático con tendencia.

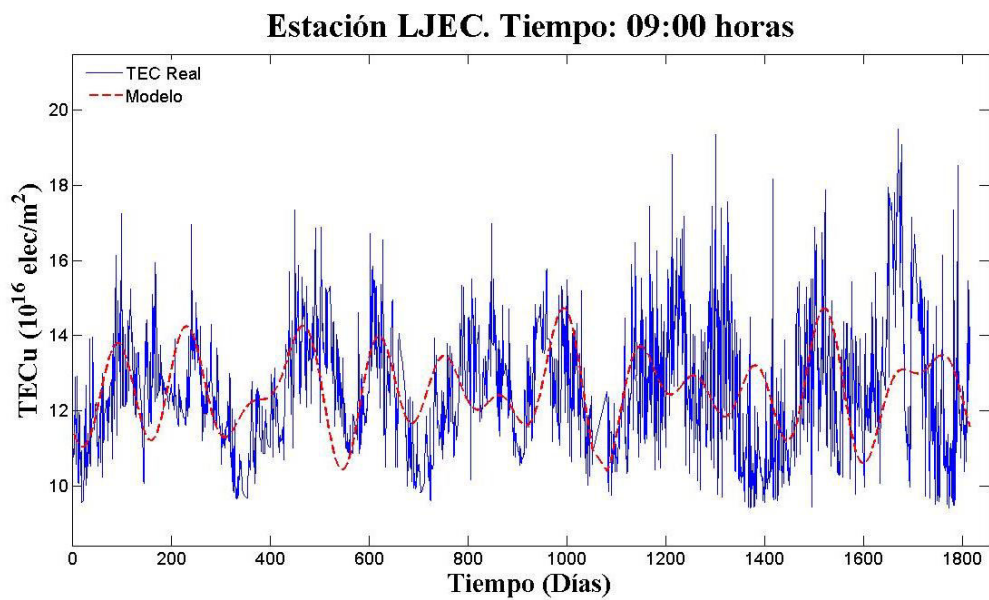


Figura 35. Gráfica del modelo matemático sin tendencia.

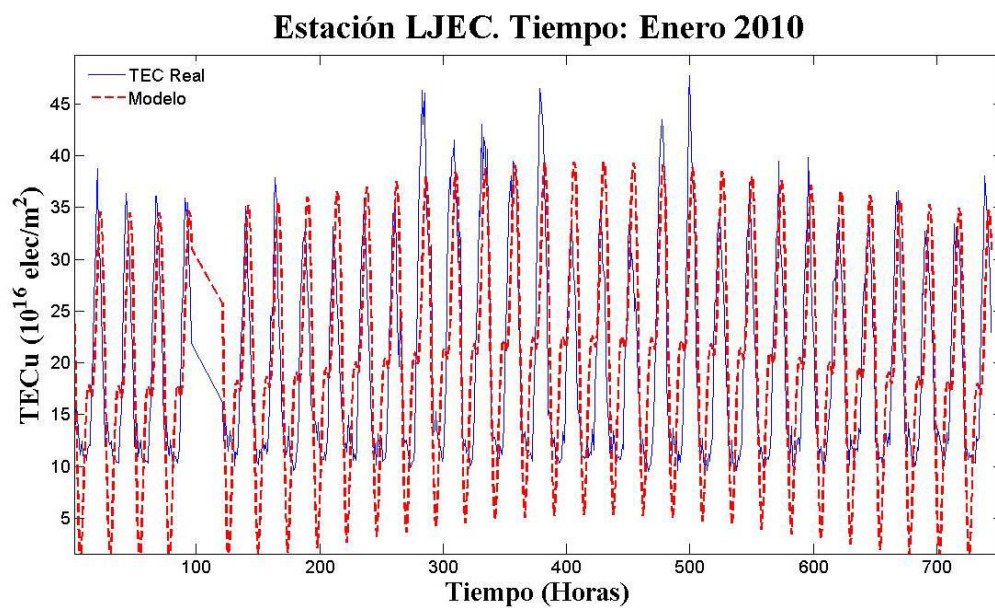


Figura 36. Gráfica del modelo matemático sin tendencia. Enero 2010

El modelo presenta un desfase en la hora 100 esto se debe a una carencia de datos en ese tiempo, con ayuda del modelo matemático obtenido se puede interpolar estos datos faltantes de tal forma que se complete las serie.

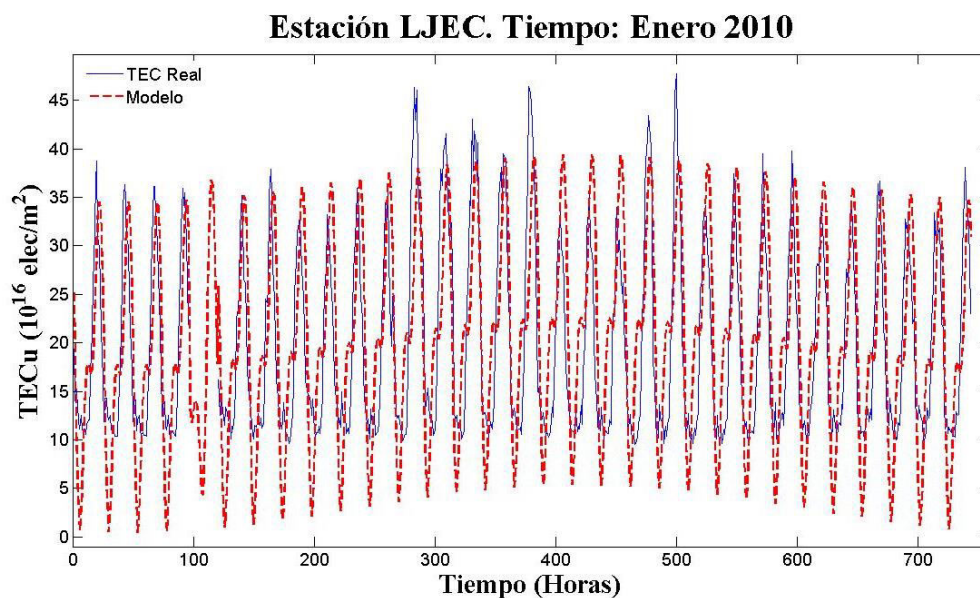


Figura 37. Modelo interpolado del mes de Enero 2010

La tabla 9, muestra los RMS entre el modelo matemático obtenido y las observaciones para todas las horas tomando en cuenta el comportamiento de la tendencia, según la prueba de Fisher el 20,8% corresponden a series sin tendencia y el 79,2% son series con tendencias. Además, se observa que los modelos sin tendencia tienen RMS menores a las series con tendencia.

Tabla 9.

Valores de RMS para los modelos matemáticos

Hora	RMS del modelo matemático	Hora	RMS del modelo matemático
00:00	11,86	12:00	7,74
01:00	10,83	13:00	10,28
02:00	8,63	14:00	12,03
03:00	6,04	15:00	13,14
04:00	3,43	16:00	13,73
05:00	2,00	17:00	14,06

CONTINÚA →

06:00	1,88	18:00	14,55
07:00	1,84	19:00	14,77
08:00	1,79	20:00	14,97
09:00	1,75	21:00	14,46
10:00	1,98	22:00	13,77
11:00	4,04	23:00	13,28

- Modelos matemáticos que aceptan la tendencia
- Modelos matemáticos que rechazan la tendencia

4.3 EXTRAPOLACIÓN DE MODELOS AJUSTADOS A SERIES

Del total de datos de TEC calculados se descartó los diez últimos valores con el fin de validar el modelo matemático obtenido para la serie. El ajuste del modelo se basó en el valor de RMS entre el TEC real y estimado. La tabla 10, muestra el valor de RMS para todas horas, se observa que las horas sin tendencia presentan los menores RMS en la predicción, es decir, tuvieron un mejor ajuste.

Tabla 10.

RMS de modelos de predicción

Hora	RMS predicción	Hora	RMS predicción
00:00	18,83	12:00	12,16
01:00	26,44	13:00	9,75
02:00	18,68	14:00	9,36
03:00	10,31	15:00	9,84
04:00	5,46	16:00	13,43
05:00	1,77	17:00	10,63
06:00	1,79	18:00	18,27
07:00	2,01	19:00	19,88
08:00	0,9	20:00	8,89
09:00	1,19	21:00	16,88
10:00	3,99	22:00	44,68
11:00	8,24	23:00	40,64

- Modelos con tendencia
- Modelos sin tendencia

También se realizó la extrapolación de TEC con la serie que contiene todas las horas del día del mes de enero del 2010, para ello se usó el modelo matemático obtenido en la ecuación (4.9) y se usaron 240 horas de extrapolación que corresponden a 10 días, obteniendo los siguientes resultados: el RMS de la extrapolación fue de 6,57 TECu mientras que gráficamente los datos extrapolados se ajustan al modelo matemático determinado como se muestra en la figura 38, donde el color azul representa a las observaciones, el color rojo al modelo matemático y el color morado a las horas extrapoladas.

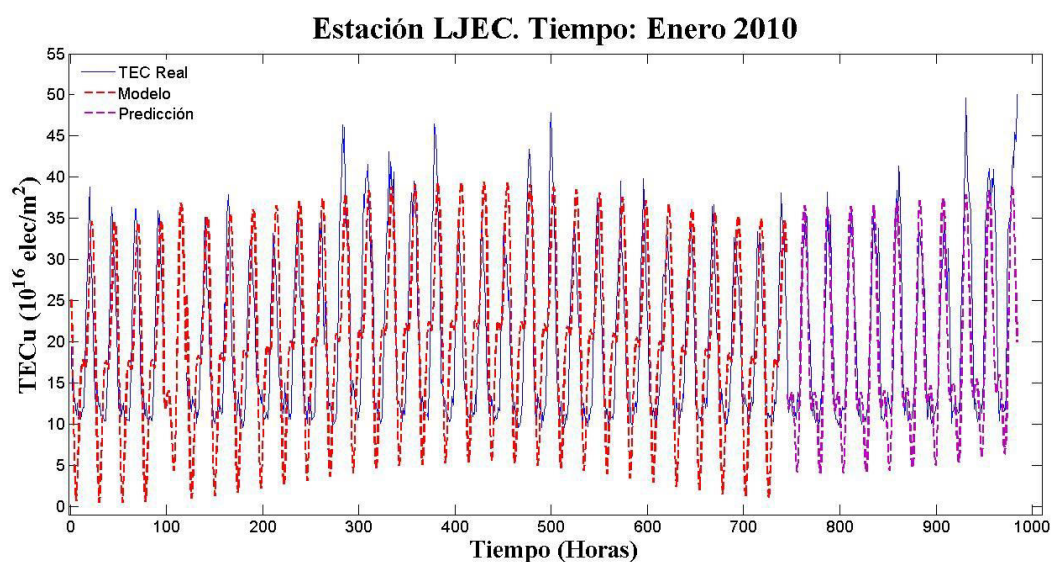


Figura 38. Modelo extrapolado del mes de Enero 2010

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se obtuvieron los valores de VTEC con ayuda del algoritmo de Klobuchar para cuatro estaciones de la REGME: CUEC, GYEC, LJEC y PTEC para las 24 horas del día durante los cinco años de estudio a través de la programación en el software Matlab, estas estaciones fueron seleccionadas porque poseían dentro de sus RINEX de navegación los coeficientes ionosféricos que son base para la aplicación del algoritmo, a partir de estos datos calculados se generaron las series temporales para cada una de las estaciones y a cada hora del día.
- En el análisis de tendencia y estacionaridad se estableció mediante pruebas estadísticas (prueba de Fisher) que el 79,2% de las 24 series presentan tendencia, por lo tanto son no estacionarias formando dos grupos, en la mañana de 00:00 a 04:00 horas y desde las 10:00 hasta las 23:00 horas, la presencia de tendencia puede ser causa del incremento en la actividad del ciclo solar actual número 24 que para el año 2013 alcanzó su máximo solar. El 20,8% restante corresponde a series sin tendencia o estacionarias comprendidas de 05:00 a 09:00 horas donde el TEC permanece estable y no se evidencia un cambio notorio frente a la evolución del ciclo solar.
- En el caso de la estacionalidad en el primer y segundo periodo fundamental el valor que se repite en mayor porcentaje es de 908 días que corresponde a 2,5 años. Para el tercer periodo que fue elegido acorde con la minimización del RMS fue de 259 días que corresponde a 0,7 años, es decir, que transcurrido este tiempo el comportamiento ionosférico tiende a ser el

mismo. Para el ajuste de los modelos a las series temporales se consideró la tendencia y estacionalidad como componentes principales.

- Para la predicción se usaron 10 datos de la base general que fueron suprimidos antes del proceso de generación de los modelos matemáticos los mismos que fueron comparados con la extrapolación de datos. Los modelos sin tendencia tuvieron mejor ajuste en su predicción y corresponden a horas de la mañana de 05:00 a 09:00. Del total de los modelos el 50% presenta RMS menor a 10 TECu, por lo tanto, sus modelos matemáticos serían los más recomendados para predecir el valor de TEC, ya que se esperaría un error en distancia de 1,6 metros aproximadamente.

5.2. Recomendaciones

- El análisis de las series temporales de TEC podría completarse con el análisis de ruido con el fin de darle mejor ajuste a los modelos matemáticos a través de la eliminación de datos generados por los diferentes tipos de ruido.
- Para el cálculo de TEC se podría aplicar otra metodología moderna como armónicos esféricos usados actualmente por la Universidad de La Plata aplicados a cada estación con el fin de obtener un TEC puntual.
- A futuro se podría generar las series temporales con datos completos de un ciclo solar correspondiente a 11 años para analizar el parámetro de tendencia a modo de establecer una correlación con el incremento y decremento de manchas solares.
- La base de datos generada en esta investigación podría ser actualizada semanalmente con el fin de dar continuidad al proceso de predicción y comprobar la efectividad de los modelos matemáticos obtenidos o caso contrario modificarlos con el propósito de obtener ecuaciones que se acerquen al fenómeno en estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alizadeh, M., Wijaya, D., Hobiger, T., Weber, Robert, & Schuh, H. (2013). Ionospheric Effects on Microwave Signals. In M. Alizadeh, D. Wijaya, T. Hobiger, Weber, Robert, & H. Schuh, *Atmospheric Effects in Space Geodesy* (pp. 35-71). Berlin: Springer-Verlag.
- Angrisano, A., Gaglione, S., Gioia, C., Massaro, M., Robustelli, U., & Santamaria, R. (2011). Ionospheric models comparison for single-frequency GNSS positioning. *ENC*. Retrieved from Ionospheric models comparison for single-frequency GNSS positioning.
- Bhatta, B. (2009). Global Navigation Systems: Insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and Others. En B. Bhatta, *Global Navigation Systems: Insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and Others* (págs. 246-247). Hyderabad: BS Publications.
- Bi, J., Tang, Y., Wu, X., Cao, J., & Ma, M. (2012). China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings. In J. Bi, Y. Tang, X. Wu, J. Cao, & M. Ma, *Evaluation of Ionospheric Correction Models in the Middle Latitude* (pp. 441-447). Beijing: Lecture Notes in Electrical Engineering.
- Brunini, C., Camilion, E., & Azilicueta, F. (2011). Simulation study of the influence of the ionospheric layer height in the thin layer ionospheric model. *Springer-Verlag*.
- Brunini, C., Meza, A., & Bosch, W. (2005). Temporal and spatial variability of the bias between TOPEX-and GPS-derived total electron content. *Springer-Verlag*, 175-176.
- Brunini, C., Meza, A., Azpilicueta, F., Van Zele, M., Gende, M., & Diaz, A. (2004). A NEW IONOSPHERE MONITORING TECHNOLOGY BASED ON GPS. *Astrophysics and Space Science*, 415-429.
- Cia - The World Factbook. (Abril de 2005). *Mapas :: Mapamundis*. Obtenido de <http://www.e-mapas.com/mapa/Mapamundi/221.html>

- Ciencias Beta. NASA. (10 de Marzo de 2013). *Actualización sobre el ciclo solar: ¿Picos gemelos?* Obtenido de https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/01mar_twinpeaks
- Coutin, G. (2007). Métodos para la detección de la variación estacional en Cuba aplicados a la vigilancia en salud. *Rev Cubana de Salud Pública*, 33-35.
- Dabas, S. (2000). Ionosphere and its influence on Radio Communications. *RESONANCE*, 28-43.
- De Oliveria, P., Galera, F., & Damasceno, L. (2000). Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth Planets Space*, 1083–1089.
- Díaz, P. A., & Vásquez, S. (4 de Marzo de 2015). *Estudio del retardo provocado por la ionosfera en la señal GNSS* . Obtenido de <https://prezi.com/1ksipchibt-o/instituto-politecnico-nacional/>
- Ezquer, R. (22 de Marzo de 2008). *Ionosfera de bajas altitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán* . Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/267791217_Ionosfera_de_bajas_latitudes_efectos_sobre_senales_de_satelites_recibidas_en_Tucuman
- Fonseca, B. (2011). Avance en el modelamiento de variables atmosféricas a partir de datos GNSS en Colombia. Costa Rica: Heredia.
- Ghasemi, A. (2012). *Propagation Engineering in Wireless Communications*. Springer Science.
- Guano, E. (2015). *Análisis de la correlación existente entre la ocurrencia de un sismo y la actividad ionosférica*. Sangolquí.
- Herrero, T. (20 de Octubre de 2014). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/tomasramon/coordenadasy-escalasm200>
- Hoque, M., & Jakowski. (2014). An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems. *Springer-Verlag* , 391-406.

- Hoque, M., & Jakowski, N. (2014). An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems. *Springer-Verlag*, 391-406.
- Hunsucker, R., & Hargreaves, J. (2002). High-Latitude Ionosphere and its effect on Radio Propagation . En R. Hunsucker, & J. Hargreaves, *Basic principles of ionosphere* (págs. 1-60). Inglaterra: Cambridge University Press.
- IERS. (2013). *International Earth Rotation and Reference Systems Service*. Obtenido de <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRS/itrs.html>
- IGM Ecuador. (2015). *Geoportal IGM*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/sismo-2016/>
- INEGI. (2006). *INEGI*. Obtenido de <http://intranet.capacitacion.inegi.gob.m>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2011). *Sistema Geodésico de Referencia* . Andalucía .
- Instituto Geográfico Nacional. (2010). Obtenido de https://www.ign.es/ign/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos_Cartograficos_def.pdf
- International Terrestrial Reference Frame. (Enero de 2016). *ITRF Website*. Obtenido de <http://itrf.ensg.ign.fr/>
- Klobuchar, J. (1975). *A first order, worldwide, ionospheric, time-delay algorithm*. Massachusetts.
- Klobuchar, J. (1987). Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 325-333.
- Klobuchar, J. (1995). En *Global Positioning System: Theory and Applications*. (págs. 485-514). Reston US: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Labraña, Kollner. (2010). *La interferencia de la ionosfera y las señales GPS*. Obtenido de http://www.kollnerlabrana.cl/PDF/409_LA%20INTERFERENCIA%20IONOSFERA%20Y%20LAS%20SEÑALES%20GPS.pdf

- Lee, C.-M., & Park, K.-D. (2011). Generation of Klobuchar Ionospheric Error Model Coefficients Using Fourier Series and Accuracy Analysis. *Korean Journal Publishing Service*, 71-77.
- Low-Latitude Ionospheric Sensor Network. (2014). *Equipos-Ionosondas*. Obtenido de Low-Latitude Ionospheric Sensor Network: http://lisn.igp.gob.pe/index.php?option=com_content&view=article&sec=16&cat=47&id=9
- Luis Garcia, A. V. (2005). *Geodesia*. Valencia.
- Mao, A., Christopher, G., Harrison, & Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research*, 2797-2816.
- Marcote, B. (2011). *Efectos del sol sobre la ionosfera*.
- Marin, J. (2010). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de Departamento de Estadística: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/EDescrip/tema7.pdf>
- Mauricio, J. A. (2007). *Introducción al Análisis de Series Temporales*. Madrid.
- Mohamad Mahdi, A. E. (2013). *Multi-Dimensional modeling of the ionospheric parameters, using space geodetic techniques*. Vienna: Grafisches Zentrum HTU GmbH.
- Peña, D. (2010). *Análisis de Series Temporales*. Madrid: Alianza Editorial.
- Pisacane, V. (2010). *Space Environmental and its effects on Space Systems*. ProQuest ebrary.
- Planeta Maxwell. (28 de Marzo de 2014). *Apuntando a un geoestacionario*. Obtenido de <http://planetamaxwell.com/apuntando-a-un-geoestacionario/>
- Recalde, J. C. (2012). Determinación del Contenido Vertical Total de Electrones para uso en posicionamiento con receptores GPS de una frecuencia. *Geoespacial*, IV(4), 24-30.

- Rodriguez-Bouza, M., Herraiz, M., Rodriguez, G., & Radicella, S. M. (2014). Efecto de la tormenta geomagnetica del 23 de abril de 2012 en el contenido electrónico total de la ionosfera sobre la región mediterránea . *Física de la Tierra*, 101-117.
- Ruiz Gómez, I., Ruiz del Arbol, J. A., Maciá, F., & De la Morena, B. (2008). Campaña de estudio sobre el centelleo ionosferico y su impacto en las comunicaciones espaciales. *Física de la Tierra*, 183-197.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analist . *Astrophys*, 263.
- SIRGAS. (2012). *SIRGAS*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://www.sirgas.org/index.php?id=155>
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2012). *Reglamento de Radiocomunicaciones*. Obtenido de http://www.itu.int/dms_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFS.pdf
- Universidad de Granada. (2015). *Departamento de Estadística e Investigación Operativa*. Obtenido de <http://www.ugr.es/~fabad/desestacionalizacion.pdf>
- Universidad de la Plata. (Enero de 2011). *South American Regional Ionospheric Maps*. Obtenido de <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>
- Vaca, K. (2015). *Influencia de la actividad ionosferica en el posicionamiento relativo en receptores de una frecuencia (L1) usando medidas de fase de las portadoras* . Sangolquí.
- Werner, G. (10 de Diciembre de 2007). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. Obtenido de <https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex211.txt>
- Ya'acob, N., & Abdurall, M. (2008). *GPS Total Electron Content (TEC) Prediction at Ionosphere layer over the Equatorial Region*. Malasia.
- Zakatov, P. (1981). *Curso de Geodesia Superior*. Moscú-Rusia: MIR.

Zhong, J., Lei, J., Dou, X., & Yue, X. (2014). Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations. *Springer*, 354,355.

Zolesi, B., & Cander, L. (2014). Ionospheric Prediction and Forecasting. En B. Zolesi, & L. Cander, *The General Structure of the Ionosphere* (págs. 11-47). Berlin: Springer-Verlag.