

# Índice de cuadros

1.1. división esquemática de la atmósfera terrestre . . . . .	1
2.1. Retardos ionosféricos en el cenit para diferentes frecuencias . . . . .	14
3.1. Características básicas de los satélites GPS . . . . .	16
3.2. Parámetros principales de WGS 84 . . . . .	18
3.3. Señales Satelitales GPS . . . . .	19
3.4. Valores para el cálculo de las órbitas para satélites GPS . . . . .	24
5.1. media y ecm para todas las horas y en intervalos de dos horas para IRI y para TECALCRNX . . . . .	47

# Capítulo 1

## Introducción

La atmósfera terrestre se puede dividir en diferentes capas según sus características (cuadro 1.1): Según su temperatura la atmósfera está constituida por la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la termosfera y la exosfera; según su densidad electrónica se puede catalogar como ambiente neutro (neutrosfera), ambiente ionizado (ionosfera) y ambiente espacial (protonosfera); Según el campo magnético se divide en dinamosfera y magnetósfera; según las variaciones en las propagaciones de las señales electromagnéticas se divide en troposfera e ionosfera.

Altitud [km]	Temperatura	Ionización	Campo Magnético	Propagación	Técnico
10000	Exosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Alta atmósfera
	Termosfera				
1000		Ionosfera			
100	Mesosfera				
10	Estratosfera	Neutrosfera	Dinamosfera		Baja Atmósfera
	Troposfera			Troposfera	

Cuadro 1.1: división esquemática de la atmósfera terrestre

Por encima de los 80 km se encuentra el ambiente ionizado que se denomina ionosfera y establece una frontera con el espacio exterior. La ionosfera es una capa dotada de una alta y variable conductividad eléctrica, debido a los electrones liberados en la intensa ionización producida por la interacción de la alta atmósfera terrestre con la radiación solar. Este proceso ocurre principalmente en el rango ultravioleta del espectro electromagnético con algunas contribuciones de los rayos X y en menor medida por las partículas cargadas provenientes del viento solar. Debido

la presencia de gas ionizado, caracterizado por una alta temperatura, la ionosfera se considera un plasma [2].

Al ser la ionosfera terrestre un medio dispersivo por naturaleza, las señales electromagnéticas generadas por los satélites pertenecientes al sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global o Global Positioning System) sufren retrasos y alteraciones. La ionosfera afecta campos como las telecomunicaciones, la ubicación a escala global, el transporte y tráfico aéreo, la agricultura de precisión, los viajes espaciales, etc, por consiguiente, es de vital importancia conocer las características y propiedades de esta capa como su densidad electrónica, su electrodinámica, sus irregularidades y los efectos que producen las variaciones de éstas en las señales.

El estudio de la ionosfera para latitudes altas es abundante y conocido. Gran cantidad de grupos de investigación, institutos y universidades han trabajado profundamente por entender el funcionamiento de esta importante capa. Por el contrario, la zona ecuatorial de la ionosfera es relativamente desconocida y es un campo abierto hacia la investigación.

Entre las mediciones que se puede realizar de la ionosfera se encuentran el Contenido Total de Electrones TEC, el Centelleo, la velocidad de las partículas presentes, los campos eléctricos y magnéticos generados, etc. Este trabajo está enfocado a realizar mediciones del TEC, el cual se determina por medio de un conteo de electrones dentro de una columna de  $1m^2$  de area, que se define comenzando en la antena receptora y terminando en el satélite GPS. A su vez, El TEC depende de la latitud geográfica, la longitud, tiempo local, estación, actividad geomagnética y su dirección.

## 1.1. Objetivos de la Tesis

Como el título lo indica, este trabajo está orientado a calcular el Contenido Total de Electrones (TEC) para la zona de Colombia. Su objetivo general es:

1. Diseñar, modelar y comparar un algoritmo que permita calcular el Contenido Total de Electrones TEC presentes en la ionosfera colombiana utilizando datos obtenidos por Sistemas de Posicionamiento Global GPS pertenecientes a la Red de Estaciones Ionosféricas de Colombia (REICO).

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Manipular los datos entregados por los GPS en el formato original del fabricante (para GPS Leica) y el formato RINEX.

2. Calcular las órbitas de los satélites pertenecientes al sistema de posicionamiento global.
3. Identificar y realizar las diferentes correcciones a los datos entregados por los GPS debido a la influencia de la ionosfera, los equipos, los relojes, la ubicación del receptor y del satélite.
4. Modelar la ionosfera diseñando un algoritmo para calcular el TEC.
5. Comparar el modelo creado con diferentes modelos ionosféricos.

## **1.2. Estructura de la Tesis**

Para cumplir con los objetivos, este trabajo se ha dividido en 6 capítulos:

El capítulo 1 incluye la introducción y los objetivos de este trabajo. El Capítulo 2 está enfocado a describir las características de la atmósfera terrestre y la ionosfera, teniendo en cuenta su generación, distribución, comportamiento y efecto que produce sobre las señales electromagnéticas. El capítulo 3 describe el funcionamiento de los Sistemas de Posicionamiento Global, la ubicación y observables básicos de GPS, el formato de intercambio de archivos y el cálculo de las respectivas órbitas de los satélites GPS. El capítulo 4 presenta el desarrollo del modelo para calcular el Contenido Total de Electrones (TEC), tanto oblicuo (sTEC) como vertical (vTEC), basado en el error generado por la ionosfera y la corrección de errores por satélite y receptor. El capítulo 5 muestra una comparación cualitativa y cuantitativa entre el modelo creado y los modelos IRI y TECALCRNX. El capítulo 6 plantea las conclusiones y las perspectivas del trabajo.

# Capítulo 2

## La Ionosfera

### 2.1. La Atmósfera terrestre

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea a la Tierra. Ésta comenzó a formarse hace unos 4600 millones de años con el nacimiento del planeta. Si bien la mayor parte de la atmósfera primitiva se perdió en el espacio, nuevos gases y vapor de agua se fueron liberando de las rocas que formaban la Tierra. La atmósfera de las primeras épocas de la prehistoria estaba formada por vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ), junto a muy pequeñas cantidades de hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ), pero con ausencia de oxígeno ( $O_2$ ). Era una atmósfera que reducía ligeramente la radiación solar, hasta que la actividad fotosintética de los seres vivos introdujo oxígeno y ozono (hace unos 2500 millones de años). La atmósfera terrestre llegó a tener una composición similar a la actual aproximadamente hace 1000 millones de años.

La troposfera es la zona más cercana a la superficie terrestre, en la cual se encuentra el aire respirable. Esta capa presenta variaciones climáticas, nubes, tormentas, etc. Esta región está comprendida desde la superficie terrestre hasta una altura de 10 a 15 km dependiendo de la latitud y la época del año. La temperatura desciende con respecto a la altura a una tasa de  $10\text{ K km}^{-1}$  [16] llegando a unos 200 K en su frontera. Se caracteriza por movimientos convectivos de aire caliente que asciende y frío que desciende.

La estratosfera es la segunda capa de la atmósfera de la Tierra llegando a alturas de 45 a 55 km, donde se encuentra el Ozono ( $O_3$ ) que genera un incremento en la temperatura debido a la absorción de luz ultravioleta. El 99 % del aire presente en la atmósfera se encuentra en la troposfera y la estratosfera [15].

La mesosfera es la tercera capa, en la cual la temperatura disminuye a medida

que se asciende, siendo la capa más fría de la atmósfera. La altura de esta capa es de aproximadamente 80 a 90 km.

Después de la mesosfera se encuentra la termosfera ( $\sim 600$  km). A esta altura el aire es muy tenue y la temperatura cambia con la actividad solar, incrementándose fuertemente en toda su extensión, ascendiendo a los 1000 K para una altura de 250 km. La estructura de la termosfera está altamente influenciada por las partículas cargadas provenientes del viento solar.

Por último se encuentra la exosfera. Por encima de los 600 km, los átomos tienden a escapar hacia el espacio por la poca interacción gravitatoria (ver figura 2.1).

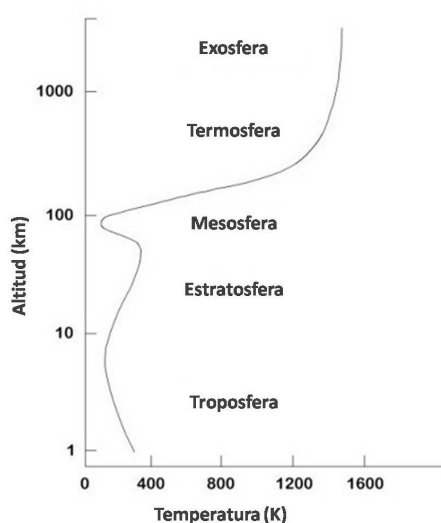


Figura 2.1: perfil atmosférico de temperatura [18].

La ionosfera es la parte de la atmósfera terrestre ionizada permanentemente debido a la fotoluminización que provoca la radiación solar. Esta zona está comprendida entre los 80 y los 650 km o más. Constituye el límite inferior de la magnetósfera encontrándose sobre la termosfera. La ionosfera permite que las ondas de radio de baja frecuencia emitidas desde la superficie terrestre sean reflejadas, posibilitando a estas viajar grandes distancias sobre la Tierra. En las regiones polares las partículas cargadas portadas por el viento solar son atrapadas por el campo magnético terrestre, incidiendo sobre la parte superior de la ionosfera y dando lugar a la formación de auroras.

La ionosfera esta compuesta básicamente por gases neutros, gases de iones (moléculas de gas atmosférico ionizado por las radiaciones solares) y gases de electrones. Estos fluidos son dinámicos y siempre se encuentran interactuando entre si. Algunos iones se recombinan con los electrones formando moléculas neutras y algunas molé-

culas se rompen formando iones. Estos procesos de recombinación y disociación son fuente de una gran energía térmica que se libera a la atmósfera.

## 2.2. Reseña Histórica

El 12 de diciembre de 1901, G. Marconi consiguió realizar de forma satisfactoria la primera comunicación radiotelegráfica transatlántica, cubriendo una distancia de 3000 km entre Gales y Terranova, en el extremo oriental de Canadá. Unos años antes, Hertz había comprobado experimentalmente la existencia de ondas electromagnéticas, cuya naturaleza era similar a la de la luz. Por este motivo el éxito de Marconi resultaba inexplicable, considerando que las ondas electromagnéticas deben propagarse en trayectos rectilíneos y que la esfericidad de la tierra impedía la visibilidad directa. De hecho, el éxito inicial fue recibido con cierto escepticismo por la comunidad científica, que en parte dudaba de su veracidad. En el año 1902 otros experimentos realizados por Marconi demostraron que las comunicaciones a distancias amplias sufrían grandes variaciones si se realizaban durante el día o la noche. Experimentos de recepción a bordo de un barco, con señales emitidas desde una estación base en tierra, mostraron que a distancias superiores a 1000 km las comunicaciones fallaban totalmente durante el día, mientras que durante la noche era posible la recepción a distancias superiores a los 3000 km. En el mismo año Arthur Kennelly en Estados Unidos y Oliver Heaviside en Inglaterra, postularon de forma independiente, la existencia de una capa ionizada en la parte alta de la atmósfera como responsable de la reflexión de las ondas electromagnéticas, explicando de este modo, el mecanismo de propagación a grandes distancias.

J. Taylor en 1903 y J. Fleming en 1906 fueron los primeros en postular que la radiación ultravioleta proveniente del Sol es la fuente que genera las cargas eléctricas en la ionosfera. Experimentos de Breit y Tuve (1925,1926) para estimar la altura en la cual se reflejaban las ondas electromagnéticas dieron comienzo a la física ionosférica. Estos desarrollos fueron seguidos por trabajos teóricos de Hulburt y Chapman que dieron las pautas iniciales para el estudio de la alta atmósfera [30].

En 1925 el diseño de la ionosonda fue de gran ayuda para el estudio de la ionosfera. La tecnología de cohetes desarrollada en la segunda guerra mundial fue usada para el estudio de las capas de la atmósfera y fue el comienzo para el desarrollo de tecnologías espaciales. En el Año Geofísico Internacional (IGY 1957-1958), se ejecutó un proyecto internacional basado en una red de ionosondas distribuidas globalmente para analizar sondeos verticales en un período de máxima actividad solar [8].

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) nace en 1973 y queda oficialmente declarado como funcional en 1995. Es un sistema que inicialmente se desarrolló con enfoque de estrategia militar pero a través de los años el gobierno de Estados Unidos decidió permitir el uso al público en general con ciertas limitaciones de exactitud. Actualmente es una de las herramientas más utilizadas para el análisis de los comportamientos de la ionosfera.

La ionosfera terrestre ha sido estudiada durante décadas utilizando técnicas de observación que hoy son consideradas convencionales. Principalmente sondeos efectuados con instrumentos localizados sobre la superficie de la Tierra como radares y emisoras ó a bordo de globos y cohetes.

### **2.3. Fuentes de Ionización**

El Sol no es un lugar tranquilo, además de una constante radiación que éste emite, sin previa advertencia la corona solar puede ser sacudida por fuertes explosiones que emanan enormes cantidades de energía. Estos eventos catastróficos son llamados eyecciones de masa coronal. La ionosfera es producida principalmente por la actividad solar, con contribuciones de radiación X, radiación ultravioleta, viento solar y eyecciones de masa coronal. Incluso los rayos cósmicos ionizan la capa más externa de la tierra generando un aumento en la velocidad y en la temperatura de las partículas. Las partículas cargadas provenientes del sol son desviadas por el campo magnético terrestre hacia uno u otro lado según su carga, mientras que las radiaciones (fotones) son absorbidas, transmitidas o reflejadas.

La ionosfera es una región dotada de una notable conductividad eléctrica debido a la población de iones positivos y electrones que aparecen como resultado de la interacción entre la radiación presente en el ambiente espacial y nuestra atmósfera neutra. En los niveles superiores de la atmósfera, donde la concentración de gases es tan tenue que apenas se distingue del vacío, las radiaciones sufren muy poca atenuación. La masa total de la ionosfera es inferior a un 0.1 % de la masa de la atmósfera. A medida que la densidad de masa aumenta en dirección a la Tierra, las radiaciones producen mayores efectos de ionización sobre las moléculas con las que chocan, liberando mayores cantidades de electrones y sufriendo también mayor atenuación.



## 2.4. Capas de la Ionosfera

A determinada altura, que varía según la frecuencia de la radiación proveniente del Sol, se logra un máximo de absorción y producción de electrones en la ionosfera. A los estratos así caracterizados, según la frecuencia de radiación ionizante, se les llama capas de Chapman y se definen como D, E y F(ver figura 2.2).

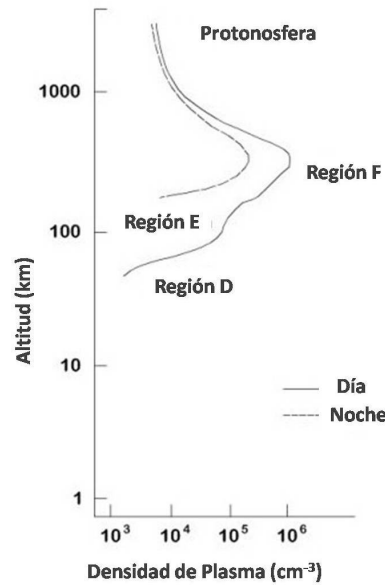


Figura 2.2: perfil ionosférico de densidad electrónica [18].

### 2.4.1. Capa D

La capa D es la capa más cercana a la superficie Terrestre. Se encuentra alrededor de los 60 y 90 km de altura. La ionización provocada por el viento solar aumenta la concentración de electrones en esta capa. Durante la noche no recibe radiación solar, desapareciendo cuando el sol se oculta. En esta zona la frecuencia de colisión de partículas es muy alta, haciendo que esta capa sea sumamente absorbente para frecuencias de transmisión por debajo de los 10 MHz. Las principales especies presentes en esta capa son muy similares a las de la baja atmósfera ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$ ,  $Ne$ ,  $He$ ). En esta zona la ionización se debe a la radiación con longitud de onda de 125.5 nm conocida como Lyman- $\alpha$ .

### 2.4.2. Capa E

La capa E o capa de Kennelly-Heaviside fue la primera en ser descubierta y cubre una zona desde los 90 a los 130 km aproximadamente. Es la capa en la que se refleja la mayor cantidad de ondas de radio. Además es de gran importancia geomagnética, ya que las corrientes que causan variaciones en el campo magnético se presentan mayormente en esta zona, como el electrochorro ecuatorial y auroral. En ciertas ocasiones aparece una ionización anómala denominada capa Es (E esporádica), que en algunos momentos puede alcanzar ionizaciones varias veces mayores a la ionización normal de la capa E. La capa E esta constituida principalmente por  $NO_2$ ,  $O_2$  y  $O$ . La radiación X entre 1 y 10 nm y la radiación UV entre 80 y 102.8 nm es la encargada de ionizar esta zona.

### 2.4.3. Capa F

La capa F se extiende verticalmente a partir de los 130 km de altitud. Debido al comportamiento variable de la capa superior e inferior, ésta se puede dividir en la capa F1 entre los 130 y 210 km y la capa F2 a partir de los 210 km. La capa F1 desaparece durante la noche mientras que la capa F2 mantiene niveles de ionización relativamente constantes entre el día y la noche, teniendo en ésta la máxima concentración electrónica a una distancia de aproximadamente 350 km sobre la superficie de la Tierra. La producción electrónica en esta zona se debe a la radiación UV entre los 10 y los 90 nm [12].

## 2.5. Anomalías Ionosféricas

En la Ionosfera se deben tener en cuenta las anomalías presentes. Las regulares como: variaciones diurnas; nocturnas; estacionales; por ciclos solares de rotación (27 días) y de manchas solares (11 años). Las variaciones irregulares como: los efectos del viento solar [42] y las tormentas magnéticas [29,37]; los efectos polares (auroras) [25]; la capa E esporádica; la anomalía ecuatorial o anomalía de Appleton; el electrojet ecuatorial y las burbujas de plasma de baja densidad [39]. Las variaciones regulares son periódicas y pueden ser predichas con suficiente precisión. Las variaciones irregulares tienen gran influencia sobre la propagación de ondas electromagnéticas debido a que estas variaciones no son constantes y pueden afectar, drásticamente y sin advertencia, las comunicaciones [8].