UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

TESIS DE MAESTRÍA

APLICACIONES DE LA TEORÍA DE LA DISTANCIA DEBYE AL ESTUDIO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL

Autor:

Claudia Lucía Cortés Cortés

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2014

APLICACIONES DE LA TEORÍA DE LA DISTANCIA DEBYE AL ESTUDIO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL

Autor:

Claudia Lucía Cortés Cortés

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

Director:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata

Codirector:

Ph.D Jorge Hernán Estrada Estrada

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2014

APPLICATIONS OF THE DEBYE'S LENGTH THEORY TO GLOBAL ELECTRIC CIRCUIT

Author:

Claudia Lucía Cortés Cortés

Thesis Presented as partial requirement for the degree of:

M.Eng. – Industrial Automation

Director:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata

Codirector:

Ph.D Jorge Hernán Estrada Estrada

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Faculty of Engineering and Architecture
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering
Manizales, Colombia
2014

A Dios,uno y trino de quien proviene todoconocimiento.
A mis padres José Hernando y Maria Cristina, por sus oraciones constantes y su apoyo incondicional.
A mis hermanitos Ana y Andrés, por sus compañía y valiosos aportes.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Eduardo Antonio Cano Plata y Jorge Hernán Estrada Estrada por la paciencia en el desarrollo de esta tesis, el impulso en los momentos de desánimo y la oportuna dirección de este trabajo.

A mis queridos compañeros de estudio Sebastian y Gabriel en quienes he encontrado una gran amistad y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A los integrantes y directores de los grupos de investigación GREDyP y GTA - Ingeniería Hidráulica y Ambientalación adscritos a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, por incentivar e impulsar el desarrollo de esta tesis.

A los Profesores Camilo Younes y Jeanette del Carmen Zambrano por dedicarme tiempo en la solución de dudas y prestarme sus contactos y bases de datos para el desarrollo de gran parte de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, por brindarme los medios físicos y económicos para culminar exitosamente estos estudios de maestría, y su apoyo para la participación en congresos; es una gran alegria hacer parte de esta comunidad universitaria.

A todos los que en algún momento me brindaron sus sugerencias y colaboración desinteresada.

Resumen

En el marco de la Maestría en Automatización Industrial se realiza el estudio del Circuito Eléctrico Global usando la distancia de una esfera Debye, calculada como un parámetro del plasma presente en la atmósfera terrestre, para discriminar perturbaciones en la ionósfera causadas principalmente por descargas eléctricas atmosféricas y precipitación de lluvias.

Esta investigación se desarrolla sobre las ciudades de Bogotá, Manizales y Samaná con información recopilada por el satélite francés DEMETER, el cual se dedicó a la investigación de las perturbaciones de la ionósfera de la Tierra debidas a actividad sísmica y volcánica; este satélite poseía la instrumentación necesaria para estudiar el plasma presente en la atmósfera terrestre.

Los resultados obtenidos de distancia Debye se relacionan con información recopilada localmente, este es el caso de la precipitación de lluvias y el daño de medidores de energía, y el número total de rayos se obtuvo de la base de datos de la World Wide Lightning Location Network – WWLLN.

Palabras clave: Circuito Eléctrico Global, Ionósfera, distancia Debye, longitud Debye, Plasma, Campo Eléctrico.

Abstract

As part of the Masters in Industrial Automation is made the Global Electrical Circuit study using the distance of one Debye sphere, calculated as a parameter of the plasma in the earth's atmosphere, to discriminate disturbances in the ionosphere primarily caused by lightning and rain precipitation.

This research is developed over the cities of Bogota, Manizales and Samana with information collected by the french satellite DEMETER, which was devoted to the investigation of disturbances in the ionosphere due to seismic and volcanic activity; this satellite had the necessary instrumentation to study the Earth's atmosphere plasma.

The results of Debye distance are related to information collected locally, this is the case of the rain precipitation and energy meters damage, and information of total number of lightning was obteined from the World Wide Lightning Location Network - WWLLN database.

Key words: Global Electric Circuit, Ionosphere, Debye distance, Debye lenght, Plasma, Electric Field.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 ÁREAS DE DESARROLLO DE LA TESIS 1
1.3 MOTIVACIONES 3
1.3.1 Eventos de precipitación 3
1.3.2 Daño de medidores en la zona nororiental de Caldas 3
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A TRATAR 3
1.4.1 Conexión electromagnética entre la tormenta y la ionósfera. 3
1.5 HIPÓTESIS 4
1.6 OBJETIVOS 4
1.6.1 Objetivo general 4
1.6.2 Objetivos específicos 4
1.7 METODOLOGÍA 5
1.7.1 Medición en la ionósfera 5
1.7.2 Procesamiento de la información 6
1.8 EXPERIMENTACIÓN 6
1.9 HERRAMIENTAS DE COMPUTACIÓN 7
1.10 ELEMENTOS DE INNOVACIÓN 7
1.11 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO 8
1.12 ESTRUCTURA DE LA TESIS 8

2 FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES 9

2.1 ATMÓSFERA TERRESTRE 9
2.1.1 La Ionósfera 11
2.2 LA IONÓSFERA COMO UN PLASMA 12
2.2.1 Parámetros del plasma 13
2.2.2 Longitud de Debye 14
2.2.3 Campo eléctrico vertical y la distancia Debye 17
2.3 EL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL 18
2.3.1 Principal generador del Circuito Eléctrico Global: Las Tormentas Eléctricas 21
2.4 LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS 21
2.4.1 Localización y predicción de rayos 24
2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 26

3 MARCO EXPERIMENTAL 27

RESUMEN 27
3.1 EL SATÉLITE DEMETER 27
3.2 EXPERIMENTOS 29
3.2.1 Experimento #1: Conexión de la distancia Debye y días tormentosos 29
3.2.1.1 Objetivo del Experimento #1 30
3.2.1.2 Procedimiento específico del Experimento #1 30
3.2.1.3 Desarrollo del Experimento #1 30
3.2.1.4 Conclusión del Experimento #1 33

3.2.2 Experimento #2: Conexión de la distancia Debye y el daño de medidores de energía ... *33*
3.2.2.1 Objetivo del Experimento #2 ... 33
3.2.2.2 Procedimiento específico del Experimento #2 ... 33
3.2.2.3 Desarrollo del Experimento #2 ... 34
3.2.2.4 Conclusión del Experimento #2 ... 37
3.2.3 Experimento #3: Conexión de la distancia Debye y las descargas eléctricas atmosféricas ... *37*
3.2.3.1 Objetivo del Experimento #3 ... 37
3.2.3.2 Procedimiento específico del Experimento #3 ... 37
3.2.3.3 Desarrollo del Experimento #3 ... 38
3.2.3.4 Conclusión del Experimento #3 ... 41
3.2.4 Experimento #4: Conexión de la distancia Debye y la precipitación de lluvias ... *41*
3.2.4.1 Objetivo del Experimento #4 ... 42
3.2.4.2 Procedimiento específico del Experimento #4 ... 42
3.2.4.3 Desarrollo del Experimento #4 ... 42
3.2.4.4 Conclusión del Experimento #4 ... 45
3.2.5 Experimento #5: Conexión de la distancia Debye y la precipitación con la entropía del campo eléctrico ... *45*
3.2.5.1 Objetivo del Experimento #5 ... 45
3.2.5.2 Procedimiento específico del Experimento #5 ... 46
3.2.5.3 Desarrollo del Experimento #5 ... 46
3.2.5.4 Conclusión del Experimento #5 ... 49
3.3 CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ... 49
3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO ... 50
4 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO ... 53
4.1 HALLAZGOS INTERESANTES ... 54
4.2 REVISIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y LOS OBJETIVOS ... 54
4.2.1 En relación con la hipótesis ... *54*
4.2.2 En relación con los objetivos ... *55*
4.3 TRABAJO FUTURO ... 56
5 REFERENCIAS ... 57
A. ANEXO A ... 63
5.1 PROCEDIMIENTO GENERAL ... 63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PROCEDIMIENTO GENERAL 6
FIGURA 2.1 RELACIÓN ENTRE CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO VERTICAL Y LA DISTANCIA DE UNA ESFERA DEBYE [14]. 17
FIGURA 2.2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE DIVERSOS PROCESOS ELÉCTRICOS EN EL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL [9]. EL VECTOR B MUESTRA EL CAMPO GEOMAGNÉTICO DE LA TIERRA, Y LAS FLECHAS MUESTRAN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO DE CORRIENTE EN LAS REGIONES DE LOS GENERADORES TROPOSFÉRICOS, IONOSFÉRICOS Y MAGNETOSFÉRICOS [24]. 19
FIGURA 2.3 CIRCUITO DE PRIMER ORDEN RC. 19
FIGURA 2.4 RESPUESTA DE LA CONDUCTANCIA DE LA ESFERA DEBYE A LA TORMENTA ELÉCTRICA 20
FIGURA 2.5 ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE CARGA EN UNA NUBE CONVECTIVA [29]. 22
FIGURA 2.6 MÉTODO DE LAS DOS ÁREAS [33] 25
FIGURA 3.1 PANTALLAZO ORBITAS EN UN DÍA SOBRE LA TIERRA [2] 28
FIGURA 3.2 PROMEDIO MENSUAL DE DISTANCIA DEBYE PARA EL AÑO 2008 31
FIGURA 3.3 PROMEDIO MULTIANUAL MENSUAL DE DÍAS TORMENTOSOS-MES [13]. 31
FIGURA 3.4 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE A) LA TENDENCIA DE LA DISTANCIA DEBYE Y B) LA TENDENCIA DEL PROMEDIO MULTIANUAL MENSUAL DE DÍAS TORMENTOSOS-MES. 32
FIGURA 3.5 PROMEDIO MENSUAL DE DISTANCIA DEBYE PARA LOS AÑOS 2008 – 2009. 35
FIGURA 3.6 NÚMERO DE MEDIDORES RETIRADOS EN SAMANÁ – CALDAS CUYA CAUSA FALLO SE CATALOGÓ COMO SOBRETENSIÓN PARA LOS AÑOS 2008 – 2009, SEGÚN DATOS EMPRESA PRESTADORA DEL SERVICIO. 35
FIGURA 3.7 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE A) LA DISTANCIA DEBYE Y B) EL NÚMERO DE MEDIDORES RETIRADOS CUYA CAUSA DE FALLO SE CATALOGÓ COMO SOBRETENSIÓN 36
FIGURA 3.8 DISTANCIA DEBYE PARA EL AÑO 2009. 38
FIGURA 3.9 NÚMERO TOTAL DE RAYOS DETECTADOS POR LA RED WWLLN (WORLD WIDE LIGHTNING LOCATION NETWORK) PARA EL AÑO 2009 EN LAS FECHAS SELECCIONADAS. 39
FIGURA 3.10 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE A) LA TENDENCIA DE LA DISTANCIA DEBYE Y B) LA TENDENCIA DEL NÚMERO TOTAL DE RAYOS. 40
FIGURA 3.11 DISTANCIA DEBYE CALCULADA CON LOS DATOS DEL SATÉLITE DEMETER. 43
FIGURA 3.12 PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN DIARIA SEGÚN DATOS DEL IDEA. 43
FIGURA 3.13 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE A) LA DISTANCIA DEBYE Y B) LA PRECIPITACIÓN DE LLUVIAS. 44
FIGURA 3.14 PROMEDIO DE 20 ESCALAS DE ENTROPÍA CALCULADA CON EL SOFTWARE DE MSE PARA EL CAMPO ELÉCTRICO EN DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIA. 47
FIGURA 3.15 PROMEDIO DE 20 ESCALAS DE ENTROPÍA CALCULADA CON EL SOFTWARE DE MSE PARA EL CAMPO ELÉCTRICO EN HF. 47
FIGURA 3.16 DISTANCIA DEBYE CALCULADA CON LOS DATOS DE SATÉLITE DEMETER. 48
FIGURA 3.17 PRECIPITACIÓN PROMEDIO DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS ADMINISTRADAS POR EL IDEA – LABORATORIO DE HIDRÁULICA 48
FIGURA 4.1 CONEXIÓN TORMENTA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL. 54
FIGURA A.1 PANTALLAZO DEL PASO INICIAL PARA ACCEDER A LA BASE DE DATOS [1] 63
FIGURA A.2 PANTALLAZO SELECCIÓN DE INSTRUMENTO [1]. 64
FIGURA A.3 PANTALLAZO SELECCIÓN DEL TIPO DE DATOS [1]. 64
FIGURA A.4 PANTALLAZO SELECCIÓN DE INFORMACIÓN [1]. 65
FIGURA A.5 PANTALLAZO REDUCCIÓN POR ZONA GEOGRÁFICA [1] 66

FIGURA A.6 PANTALLAZO SELECCIÓN DE MEDIAS ORBITAS PARA DESCARGA [1]..... 66
FIGURA A.7 PANTALLAZO SELECCIÓN DEL PAQUETE A DESCARGAR [1]..... 67
FIGURA A.8 PANTALLAZO DESCARGA DEL ARCHIVO [1]..... 67
FIGURA A.9 VENTANA SOFTWARE PARA LECTURA DE DATOS DMT_N1 SATÉLITE DEMETER..... 68

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 HERRAMIENTAS USADAS EN ESTA TESIS. 7
TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS A BORDO DEL SATÉLITE DEMETER [43]..... 28
TABLA 3.2 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN..... 50

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La aplicación del cálculo de la distancia de la esfera Debye en el estudio de las variaciones ionosféricas producto de la actividad eléctrica propia de las tormentas eléctricas presenta la posibilidad de mejorar el entendimiento del fenómeno del rayo.

"Actualmente es posible conocer la actividad global tormentosa, al menos de una forma aproximada, gracias a los sensores de detección por satélite, que detectan la luminosidad originada por los rayos dentro de las nubes tormentosas. El primero de estos sensores, OTD (Optical Transient Detection), se puso en funcionamiento en el año 1995. Diariamente se producen en todo el planeta unas 44.000 tormentas y un número de rayos estimado en 8.600.000 (100 por segundo), lo que resulta en una densidad media anual de 6 rayos/km2 para todo el planeta.

En las áreas continentales, la mayor actividad tormentosa se concentra en la franja ecuatorial con un número medio de 100-200 tormentas anuales, siendo la zona ecuatorial de África, con una densidad anual superior a 70-80 rayos/km2, la región más tormentosa del planeta. La mínima actividad tormentosa aparece sobre las zonas polares y algunos desiertos tropicales con valores inferiores a 1-5 días de tormenta al año respectivamente y densidades anuales, en general inferiores a 0,1 rayos/km2. En latitudes medias, el número anual de tormentas está comprendido entre 10 y 40, con un máximo de hasta 80 en el sudeste de los Estados Unidos, donde se registran entre 20-30 rayos/km2"[1].

Es por ello que esta tesis propone el estudio de las descargas eléctricas a través del cálculo de un parámetro del plasma conocido como distancia Debye en la ionósfera.

1.2 Áreas de desarrollo de la tesis

La aplicación de la distancia Debye al estudio de las variables físicas recopiladas por el satélite DEMETER en la ionósfera y su relación con diferentes eventos como la

precipitación de lluvias o las descargas eléctricas atmosféricas, podría introducir un nuevo factor discriminante para ser usado en mejorar la instrumentación existente para caracterizar esta clase de eventos, a lo cual también se le podría adicionar la aplicación de la teoría de la entropía al estudio del campo eléctrico recopilado por el satélite DEMETER en la ionósfera y su relación con la precipitación de lluvias.

Los objetivos científicos específicos del instrumento sonda de Langmuir ISL a bordo del satélite DEMETER son mapear la mayoría de los parámetros del plasma (principalmente densidad y temperatura electrones) y estudiar sus variaciones asociadas con los eventos de la tierra y otras fuentes de perturbaciones. ISL es una sonda de Langmuir de barrido en tensión. Un barrido completo de tensión se realiza en 1 s, lo que permite obtener una característica corriente-voltaje (I-V) cada segundo. La mayoría de los parámetros del plasma extraídos del análisis de las características I-V se obtienen con 1 s de resolución temporal, que corresponde a alrededor de 7 km de resolución espacial sobre los 700 kilometros de altitud de la órbita del satélite DEMETER[1].

El objetivo del instrumento de campo eléctrico ICE a bordo del satélite DEMETER es llevar a cabo un sondeo continuo de los campos eléctricos DC y AC en un amplio rango de frecuencias y con una alta sensibilidad, con el fin de buscar posibles ondas electrostáticas o electromagnéticas en la ionósfera que podrían ser inducidas por la actividad sísmica. El instrumento y el procesamiento de datos a bordo han sido diseñados para proporcionar un conjunto óptimo de datos en los diferentes rangos de frecuencia, haciendo énfasis en la caracterización completa de las 3 componentes de las ondas a frecuencias inferiores a 1 kHz y una única forma de onda y medición del espectro a frecuencias más altas. El grupo de investigación a cargo de este experimento ha definido cuatro rangos de frecuencia: DC / ULF [0-15 Hz], ELF [15 Hz-1 kHz], VLF [15 Hz-17.4 kHz] y HF [10 kHz-3.175 MHz]. Dependiendo del rango de frecuencia y los modos de operación de los sensores de campo eléctrico, los datos almacenados pueden ser de dos tipos: forma de onda, obtenida de la diferencia de voltaje entre dos sensores o la medida de un solo sensor y el potencial del satélite; o el espectro de potencia de la señal obtenida de la diferencia de voltaje entre dos sensores [2].

Para esta propuesta de investigación se aplicará la teoría de entropía de múltiples escalas solo a las formas de onda de campo eléctrico en los diferentes rangos de frecuencia para obtener la más discriminante respecto del evento caso de estudio.

1.3 Motivaciones

1.3.1 Eventos de precipitación

La ciudad de Manizales históricamente ha sido una ciudad donde las lluvias han predominado, siendo esto propio de su condición de ciudad de media montaña andina; como ciudad altamente amenazada por efecto de deslizamientos, terremotos, eventos meteorológicos de gran magnitud, entre otros, la lluvia ha sido una de las variables que más ha afectado a la ciudad, motivo por el cual se han generado herramientas para cuantificar la lluvia y comprender sus efectos adversos [3].

El historial de desastres causados por eventos de lluvia fuerte o constante hace de esta ciudad el escenario propicio para generar herramientas innovadoras destinadas al estudio de la predicción y prevención de desastres.

1.3.2 Daño de medidores en la zona nororiental de Caldas

Dado el estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales para la empresa prestadora del servicio de energía eléctrica en el que se registró la cantidad de medidores reportados como dañados y cuya causa de daño se catalogó como sobretensión, permitirá realizar estudios como este con miras a mejorar la prestación del servicio en estas zonas de difícil acceso.

1.4 Definición del problema a tratar

1.4.1 Conexión electromagnética entre la tormenta y la ionósfera.

El Circuito Eléctrico Global (CEG) es un sistema integral de corrientes, formado por un agregado de capas geofísicas y fuentes eléctricas. En consecuencia, este determina las propiedades físicas de la magnetosfera, ionósfera, atmósfera y litosfera, y es justo en la ionósfera donde se estudia esta propuesta.

El Circuito Eléctrico Global (CEG) relaciona el campo eléctrico y la corriente que fluye en la baja atmósfera, ionósfera y magnetosfera formando un condensador esférico gigante [4]; [5]; [6]; [7]; [8] el cual tiene como principal generador o fuente eléctrica las tormenta eléctricas, las cuales cargan el circuito a un potencial de varios cientos de voltios [9] e impulsan la corriente vertical a través de la resistencia de la atmosfera.

En la baja atmósfera (altitudes <70 km) aparece el campo eléctrico de 'buen tiempo'. Es un campo eléctrico cuasi-estacionario que desciende verticalmente hacia la superficie de la tierra en el que los gases presentes en esta zona son considerados como aislantes parciales [10].

El mantenimiento de la diferencia de potencial es atribuido a las nubes cumulonimbos (tipo de nubes grises oscuras), las cuales pueden interpretarse como una batería conduciendo una corriente del orden de 1 A desde la Tierra hasta la atmósfera superior [11].En el circuito eléctrico global estas nubes actúan como una batería eléctrica suministrando cargas a la atmósfera.

Aunque las descargas eléctricas a tierra se interpretan como un proceso de descarga de la nube de tormenta, estos también pueden ser considerados como de carga del circuito eléctrico mundial [12].

1.5 Hipótesis

La distancia Debye es un elemento discriminante en el estudio de perturbaciones en la ionósfera causadas por cambios en el circuito eléctrico global.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Utilizar la dinámica de la esfera Debye en la ionósfera sobre Bogotá D.C., Manizales y Samaná para discriminar descargas eléctricas atmosféricas, precipitación de lluvias y quema de medidores de energía.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Estudiar el estado del arte en relación a la dinámica de la esfera Debye.
2. Implementar el cálculo de la distancia de una esfera Debye como discriminante de actividad eléctrica en la ionósfera.
3. Evaluar el comportamiento de la ionósfera frente a las descargas eléctricas atmosféricas utilizando como herramienta la esfera Debye.
4. Caracterizar los eventos de precipitación de lluvias sobre la ciudad de Manizales.
5. Utilizar la base de datos de la empresa prestadora del servicio eléctrico en la zona nororiente de Caldas sobre la quema de transformadores y medidores con el fin de correlacionar la actividad ceráunica con la quema de medidores.

Para cumplir con los objetivos planteados, se han realizado una serie de pasos que se listan a continuación:

Etapa 1: Revisión de la bibliografía para conocer el estado del arte al inicio de la tesis.

Etapa 2: Desarrollo de un algoritmo que permita la reducción geográfica de los datos recopilados por el satélite DEMETER para luego cruzar dicha información con los datos del evento a estudiar: descargas eléctricas atmosféricas, precipitación de lluvias o cantidad de medidores dañados.

Etapa 3: Cálculo de la distancia Debye con los datos recopilados por el satélite DEMETER y obtención de gráficos de distancia Debye (cm) vs. Fecha (dd.mm.aaaa).

Etapa 4: Obtención de gráficas de los eventos a estudiar en las mismas fechas que la información obtenida del satélite DEMETER.

Etapa 5: Realización del análisis y conclusiones de los diferentes experimentos realizados.

1.7 Metodología

En el desarrollo de esta propuesta de investigación consta los siguientes pasos: filtrado, pre -procesado y procesado: el proceso de filtrado consiste en seleccionar y descargar los datos recolectados por el grupo de investigación del satélite DEMETER con la información de posición geográfica del lugar a estudiar; el proceso de pre - procesado consiste en ordenar dichas series para calcular la distancia Debye o en un caso para ser procesadas por el software de análisis no lineal de Entropía Múltiescala (MSE) y el procesado es el momento de calcular la distancia Debye con los datos ordenados y obtener las gráficas respectivas.

1.7.1 Medición en la ionósfera

Haciendo uso de la información recopilada y siguiendo la órbita del satélite DEMETER sobre zonas de actividad sísmica en el mundo y se han utilizado sus sensores para medir las variaciones de algunos parámetros de la ionósfera y de campo eléctrico relacionados a tormentas eléctricas.

Algunas variables electromagnéticas de la ionósfera medidas por el DEMETER y serán usadas en esta tesis se listan a continuación [2]:

- Densidad de Electrones.
- Temperatura del Electrón.

- Magnitud de Campo Eléctrico.

1.7.2 Procesamiento de la información

El propósito es obtener información nueva a partir de la información medida por el satélite. En la Figura 1.1 se presenta el procedimiento general descrito en el Anexo A, para seleccionar y descargar la información de la base de datos del satélite DEMETER.

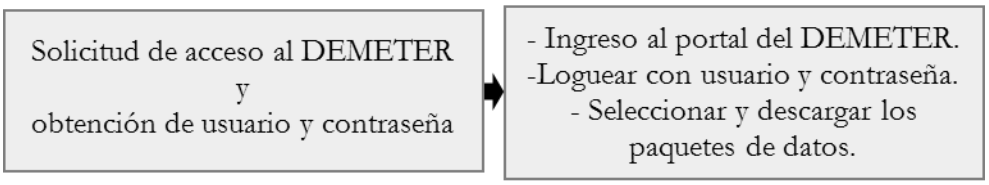

Figura 1.1 Procedimiento general

Luego del procedimiento general se realiza un procedimiento específico para cada experimento, el cual se describe en el Capítulo 3.

Los siguientes procedimientos matemáticos fueron utilizados en el procesamiento de los datos:

a) *Análisis electrodinámico de la esfera Debye.*

   Los datos del satélite se usarán para calcular la distancia Debye, la cual se calcula con los datos de temperatura y densidad de electrónes.

b) *Entropía de múltiple escala.*

Las series de tiempo serán usadas para evaluar la regularidad de los campos electromagnéticos detectados por el satélite DEMETER.

1.8 Experimentación

Se realizaron algunos experimentos usando los siguientes instrumentos del satélite DEMETER:

- ISL: una sonda de Langmuir
- ICE: un sistema de 4 sensores de campo eléctrico

Además se hizo uso de otras bases de datos para obtener información sobre los eventos a estudiar:

- El promedio multianual mensual de días con precipitación y días tormentosos sobre Bogotá D.C.; información tomada del libro El Rayo Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología[13].
- El número de medidores retirados en Samaná – Caldas cuya causa fallo se catalogó como sobretensión se obtuvo del estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales para la empresa prestadora del servicio eléctrico.
- La información del número total de rayos se obtuvo de la base de datos de la World Wide Lightning Location Network - WWLLN para el año 2009.
- La información de precipitación de lluvias se obtuvo de la base de datos de la red de monitoreo instalada en diferentes puntos de la ciudad de Manizales, la cual es administrada por el Instituto de Estudios Ambientales – IDEA de la Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales.

1.9 Herramientas de computación

Las siguientes herramientas fueron usadas para adquirir y procesar la información registrada por el satélite DEMETER. Ver Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Herramientas usadas en esta tesis.

	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL
Adquisición	IDL - rd_dmt_n1_V1.5:software del Demeter
Formato	Microsoft Office Excel
Proceso	Microsoft Office Excel, MSE (Multi-scale entropy)
Configuración del MSE	La aplicación del MSE usó los siguientes parámetros: r = 0.15 y m = 2.

1.10 Elementos de innovación

a) En teoría.

Se ha usado el desarrollo matemático de [14] el cual parte de las ecuaciones de Maxwell para calcular la respuesta de la esfera Debye en la ionósfera en relación con la actividad sísmica para calcular la respuesta de la esfera Debye en la ionósfera en relación con la precipitación de lluvias y con el número de rayos.

b) Experimental.

La realización de varios experimentos modelando la ionósfera como una red de esferas de Debye, indicaría que la distancia Debye se consolida como un indicador de tormenta eléctrica con precipitación de lluvias.

1.11 Conclusión del capítulo

En este capítulo se ha logrado exponer el problema a tratar en los siguientes capítulos de esta tesis, se ha planteado la hipótesis a verificar y se ha propuesto la distancia de una esfera Debye como el método de solución al problema planteado, que será descrito en los próximos capítulos.

1.12 Estructura de la tesis

El capítulo 2 presenta las bases teóricas y algunas ecuaciones que serán el fundamento para el desarrollo de la tesis, haciendo énfasis en el cálculo de la distancia Debye y su relación con la penetración del campo eléctrico vertical en la ionósfera.

El capítulo 3 presenta los resultados que se obtuvieron a partir cálculo de la distancia Debye con los valores de densidad y temperatura de electrones medidos en la ionósfera por el satélite DEMETER.

Para finalizar, el capítulo 4 presenta las conclusiones derivadas del desarrollo de esta tesis y el trabajo futuro.

2 FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES

En el presente capítulo se presentan las bases teóricas y algunas ecuaciones que serán el fundamento para el desarrollo de la tesis y un apropiado entendimiento del lector. Se describe la atmósfera terrestre donde la capa ionizada se llama ionósfera y sus parámetros al ser tratado como un plasma, haciendo especial énfasis en el parámetro de distancia Debye. La distancia Debye es el parámetro es con el cual se halla la distancia sobre la cual se obtiene un balance entre la energía térmica de la partícula y la energía electrostática resultante de cualquier separación de carga por lo que es usada en el estudio de las perturbaciones ocurridas en la ionósfera debidas al desarrollo de una tormenta eléctrica.

Luego se presenta el circuito eléctrico global donde se sugiere que los rayos son los principales generadores del circuito y mantienen una diferencia de potencial entre la superficie de la tierra y la ionósfera.

Finalmente se presentan las generalidades del rayo, el fenómeno físico y las etapas, y se termina mostrando los principales métodos de predicción y localización del rayo.

2.1 Atmósfera Terrestre

La atmósfera terrestre es una capa de gas que rodea toda la superficie de la Tierra y es gracias a ésta que es posible la existencia de la vida en el planeta, debido a que evita los grandes cambios de temperatura que se producirían de no existir; además el ozono absorbe gran parte de la radiación ultravioleta proveniente del Sol. También actúa como escudo protector contra meteoritos, los cuales se incineran producto de la fricción al contacto con los gases. Dentro de los elementos más importantes que constituye la atmósfera se encuentra el oxígeno, vital para la existencia de vida, y el vapor de agua responsable de la existencia de lluvias en el planeta. Además el movimiento de la

atmósfera es uno de los factores determinantes en la existencia de diferentes climas [15].

"La composición de la atmósfera es una mezcla de diferentes tipos de gases entre los cuales destacan el oxígeno y el nitrógeno que constituyen en conjunto el 99% del volumen en total.

La atmósfera se mantiene alrededor de la Tierra por la fuerza de gravedad que ejerce el planeta sobre las partículas que conforman el gas, esta fuerza permite que la capa no escape al exterior y por ende no desaparezca. A su vez la atmósfera se puede dividir en cinco capas principales que se determinan considerando los cambios de temperatura respecto de la altura [16][17]:

- Tropósfera: Capa que va desde la superficie de la Tierra hasta una altura de 6 km en los polos y de 20 km en el ecuador. Aquí la temperatura decrece con la altura a una taza de 10 $^{o}Kkm^{-1}$ llegando a un mínimo de 200 ^{o}K en el límite con la estratósfera[17]. Alrededor del 80% de la masa total de la atmósfera está contenida en esta capa.

- Estratósfera: Se extiende desde el límite superior de la tropósfera hasta una altura de 50 km aproximadamente. En esta capa la temperatura se incrementa con la altura debido a que el Ozono presente absorbe gran cantidad de luz ultravioleta[16][17].

- Mesósfera: Se sitúa por encima de la estratósfera entre los 50 km hasta los 80 km de altura. Las temperaturas vuelven a descender a medida que se aumenta en altitud, aquí se tienen las temperaturas más bajas dentro de la atmósfera.

- Termósfera: Capa que va desde los 80 a los 700 km aproximadamente. La temperatura aquí aumenta con la altura de manera casi constante. Este aumento se debe a que las moléculas y átomos presentes en la capa absorben grandes energías proveniente de la radiación solar produciéndose el proceso de ionización y por otro lado iones y electrones se recombinan formando una molécula neutra. Ambos procesos hacen que la temperatura aumente [16][17]. La temperatura máxima que se alcanza en la capa varía según el período solar, se puede llegar hasta los 2000 ^{o}K en períodos de máximo solar y de 500 ^{o}K en mínimo solar para una altura de 500 km aproximadamente.

- Exósfera: Última capa exterior de la atmósfera que tiene como límite inferior la termósfera y llega hasta los 10.000 km por sobre la superficie terrestre justo

en el límite donde empieza el espacio interplanetario. Los gases en la exósfera pueden escapar al espacio ya que la gravedad es sumamente débil en esta zona.

Además de las cinco capas principales en que se divide la atmósfera, existen otras capas que se conforman por propiedades distintas a la de temperatura. Una de estas capas es la ionósfera, cuya principal características es estar ionizada. La ionósfera está contenida en la termósfera y sus límites en alturas coinciden; la ionización se origina por efecto de la radiación solar que entrega la suficiente energía a las moléculas y átomos para que se separen en iones y electrones libres. El proceso de ionización se produce entre los 80-800 km porque existe un equilibrio entre la densidad de moléculas existente en la atmósfera y la radiación solar a estas alturas. Por sobre los 800 km la ionización no se produce de manera tan masiva porque la densidad de partículas en la atmósfera es muy baja. Por otro lado, en alturas inferiores a los 80 km las partículas solares que llegan son insuficientes debido a los choques que se producen en altitudes superiores donde la densidad de partículas en la ionósfera es mayor" [15].

2.1.1 La Ionósfera

"Debido a investigaciones sobre propagación y reflexión de ondas de radio, se ha comprobado que a partir de los 80 km aproximadamente, la radiación ultravioleta, los rayos X y la lluvia de electrones procedentes del Sol son capaces de proveer la suficiente energía para separar los electrones de un átomo o una molécula neutra, este fenómeno es conocido como ionización. Esta nube de gas ionizado en la atmósfera forma un plasma que es llamado ionósfera. Por otra parte, existe un proceso contrario a la ionización llamado recombinación, en el cual un electrón que se encuentra lo suficientemente cerca de un ion es atrapado y confinado a moverse en armonía con éste [18].

La ionósfera entonces está compuesta por gases neutros, gases de iones (moléculas atmosféricas ionizadas por la radiación solar) y gases de electrones. Estos gases se encuentran libres en constante movimiento interactuando entre sí. Dentro de las energías que influyen en este movimiento se encuentra la cinética que tiene directa relación con la ionización y recombinación de átomos y moléculas; y la fuerza eléctrica que también contribuye al movimiento debido a la interacción que se produce entre las partículas cargadas dentro de la ionósfera.

Los límites de la ionósfera van desde los 60-80 km hasta los 700-800 km, esta variación entre sus márgenes inferior y superior se debe a que su estructura (y a su vez

la altura) varía dependiendo de la hora del día o de la noche. En la noche, iones de la parte inferior y más densa de la capa se recombinan con electrones libres haciendo desaparecer la parte inferior ionizada. En la parte superior de la capa esta recombinación ocurre con menos frecuencia debido a que su densidad es bastante menor que en las partes bajas. Por tanto durante el transcurso de una noche permanece casi inalterable, pero por efecto de que la capa inferior ionizada se eleva durante la noche, es posible en algunas ocasiones que en la parte superior ocurra recombinación. La ionósfera también es conocida como termósfera. Se utiliza el nombre ionósfera al referirse a sus propiedades de ionización y termósfera al hablar de sus características de temperatura" [15].

La ionósfera a su vez se puede subdividir en subcapas caracterizadas por la densidad de iones y electrones a cada altura, como también por la ionización y recombinación de las partículas. Estas subcapas son la D, E y F (F_1, F_2). La subcapa D se sitúa sobre los 90 Km, y en ella la concentración de electrones es entre 10^3 - 10^4 por centímetro cúbico. La subcapa E se encuentra entre los 90 y 140 Km, con una densidad electrónica 10^5 cm^{-3}. La subcapa F se sitúa por encima de los 140 Km, con una densidad electrónica media de 10^6 cm^{-3} [19]. Debido a las características de ionización y densidad la capa va cambiando su capacidad de reflexión de ondas de radio, llegando a una frecuencia máxima de reflexión a una altitud aproximada de 400 km.

2.2 La ionósfera como un plasma

"El plasma, también llamado el cuarto estado de la materia, es el más abundante en el universo. Es un gas cuasi-neutro constituido por moléculas neutras, iones y electrones que se mueven libremente.

A cualquier altura dentro de la atmósfera es posible encontrar plasma, incluso a altitudes donde se desarrolla la vida, pero las condiciones de temperatura influyen en si el gas se podrá mantener ionizado o no. A bajas alturas los átomos son capaces de perder un electrón, pero lo recuperan rápidamente. Esto no ocurre cuando las temperaturas son en extremo altas, como pasa en la ionósfera donde se llega por sobre los 2000 ºK y las moléculas son capaces de absorber esta energía y moverse lo suficientemente rápido para que se produzcan colisiones capaces de liberar electrones y así exista la ionización. Otra fuente de energía son los vientos solares que entran en la atmósfera produciendo choques entre las partículas. Para que se produzca la ionización se debe superar un umbral de energía para liberar un electrón desde una molécula neutra, llamada "Energía de ionización". Por ejemplo, en el caso del hidrógeno, la

energía de ionización tiene un valor de 13,6 eV y dependiendo del nivel orbital donde se encuentre el electrón, la energía necesaria para liberarlo será múltiplo de 13,6 eV"[15].

Es por esto que haciendo uso de satélites con instrumentación adecuada para medir parámetros del plasma es posible estudiar las perturbaciones causadas por cambios en el circuito eléctrico global.

2.2.1 Parámetros del plasma

"La propiedad por la que el plasma posee de manera aproximada el mismo número de partículas positivas que de negativas se denomina *cuasineutralidad*. Para que el plasma sea cuasi-neutro en el estado estacionario, es necesario tener casi el mismo número de cargas de un signo y de otro por elemento de volumen. Tal elemento de volumen debe ser lo suficientemente grande para contener el suficiente número de partículas, y lo suficientemente pequeño respecto a las longitudes características de las variaciones de los parámetros macroscópicos tales como la densidad y la temperatura. En cada elemento de volumen los campos de la distribución espacial de carga microscópica de los portadores de carga individuales deben cancelarse con los otros para conseguir la neutralidad de carga macroscópica.

La escala característica de longitud, λ_D, se denomina *longitud de Debye o distancia Debye* y es la distancia sobre la cual se obtiene un balance entre la energía térmica de la partícula, que tiende a perturbar la neutralidad eléctrica, y la energía potencial electrostática resultante de cualquier separación de carga, que tiende a restaurar la neutralidad de carga. Para que el plasma sea cuasineutro, la dimensión física del sistema $\boldsymbol{L}$, debe ser grande comparada con λ_D.

Un electrodo o pared en contacto con el plasma normalmente afectará solo a sus alrededores más inmediatos del plasma. A menos que hayan grandes flujos de corriente en el plasma, o que sea altamente turbulento, un plasma tenderá a formar una vaina superficial para apantallarse él mismo de los campos eléctricos aplicados. La *distancia de apantallamiento* característica es aproximadamente igual al espesor de la vaina que se forma entre el plasma y la pared envolvente. En las vainas no se verifica la cuasineutralidad. Según esta descripción el plasma siempre estará separado de la pared mediante vainas.

Ya que el efecto de apantallamiento es el resultado del comportamiento colectivo dentro de la esfera de Debye de radio λ_D, es necesario que esta esfera contenga las suficientes partículas. El número de partículas dentro de la esfera de Debye es $(4\pi/3)n_e\lambda_D^3$. El término $n_e\lambda_D^3$ se denomina normalmente parámetro del plasma Λ. La densidad de electrones por unidad de volumen se denota como n_e.

La frecuencia de oscilación típica en un plasma completamente ionizado es la *frecuencia del plasma* (electrónica) ω_{pe}. Si la cuasi-neutralidad del plasma está distorsionada por alguna fuerza externa, los electrones, teniendo más movilidad que la mayoría de los iones pesados, son acelerados en un intento de restaurar la neutralidad de la carga. Debido a su inercia se moverán más allá de su posición de equilibrio, resultando una oscilación colectiva rápida alrededor de los iones más masivos [Lieberman, 1994]. Una oscilación cuantizada del plasma de un conductor, con una energía típica de $\mathrm{E}_p = \hbar\omega_{pe}$; se conoce como plasmón, con $\hbar$ la constante de Planck reducida.

La frecuencia electrónica del plasma es crítica para la propagación de radiación electromagnética en plasmas, ya que bajo ciertas condiciones la radiación atravesará el plasma y en otras será reflejada"[20].

Entre los parámetros aquí descritos se hará uso de la distancia de apantallamiento o longitud de Debye para estudiar sus variaciones respecto de cambios en el circuito eléctrico global.

2.2.2 Longitud de Debye

La detección de campos electrostáticos en las cargas en un plasma conduce a la longitud de Debye[21].

Primero se considera una carga positiva q. El potencial a una distancia r desde la carga es

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{2.1}$$

Ahora, considerando una carga positiva q en medio de un plasma, esta carga atrae electrones de su vecindad y repele iones positivos. Se calculará el potencial ϕ para este caso.

Si se permite a la partícula tener tanto energía cinética y energía potencial, el factor de probabilidad se convertirá en $\exp\left(-\frac{\frac{1}{2}mv^2+q\phi}{kT}\right)dv_x dv_y dv_z$. ϕ dependerá de la posición entonces la probabilidad dependerá también de la posición.

La densidad de partículas se expresa como $n=\int f(v)dv_x dv_y dv_z$ entonces $n \propto \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right)$ para los electrones $n_e = n_0 \exp\left(-\frac{-e\phi}{kT}\right)$, y para los iones (supóngase que se ionizan por separado) $n_i = n_0 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right)$.

La ley de Gauss se puede expresar como

$$\nabla.\mathrm{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{2.2}$$

y $\mathrm{E} = -\nabla\phi$ entonces

$$-\nabla^2\phi = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{2.3}$$

esta es la ecuación de Poisson.

La densidad de carga es $\sigma = -en_e + en_i = en_0\left(-\exp\frac{e\phi}{kT}+\exp\frac{-e\phi}{kT}\right)$. Asumiendo que este termino de potencial es muy pequeño, $e\phi \ll kT$, entonces la densidad de carga será $\sigma \cong -en_0\left(1+\frac{e\phi}{kT}\right)+en_0\left(1-\frac{e\phi}{kT}\right)=-\frac{2n_0e^2\phi}{kT}$.

Haciendo uso de coordenadas esféricas y asumiendo simetría esférica

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\phi}{dr}\right) \tag{2.4}$$

la ecuación de Poisson se convierte en

$$-\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\phi}{dr}\right)=-\frac{2n_0e^2\phi}{\varepsilon_0 kT} \tag{2.5}$$

con solución como se muestra a continuación

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}\exp\left(-\frac{r}{\sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{2n_0 e^2}}}\right) \tag{2.6}$$

esta ecuación muestra que el potencial cae de forma exponencial.

Si se llama al término $\sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{2n_0 e^2}} \rightarrow \lambda_D \rightarrow$ distancia Debye, entonces la ecuación (2.6) se puede reescribir así

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}\exp\left(-\frac{r\sqrt{2}}{\lambda_D}\right) \tag{2.7}$$

Más allá de algunas longitudes de Debye, el apantallamiento por el plasma es muy efectivo y el potencial debido a la carga externa q es insignificante. Esto proporciona condiciones para determinar si se tiene un plasma o no: i) el sistema debe ser suficientemente grande $L \gg \lambda_D$ y ii) debe haber suficiente electrones para producir el apantallamiento $N_D \gg 1$, donde N_D es el número de electrones en una esfera Debye.

Supóngase que hay una concentración local de carga. Si las dimensiones del plasma son mucho mayores que λ_D, luego todo el plasma sigue siendo neutral (se puede describir el plasma como cuasineutral) y se puede tomar $n_e \cong n_i \cong n_0$.

Si se pone un electrodo dentro de un plasma, este será apantallado por una vaina de espesor $\approx \lambda_D$.

Finalmente la distancia Debye se puede expresar como

$$\lambda_D = 6.9\sqrt{\frac{T}{n_e}} \tag{2.8}$$

donde T está en ^oK.

Esta expresión obtenida para la distancia Debye es usada para realizar el cálculo sobre los datos de temperatura y densidad de electrones, y se muestra su variabilidad respecto de la penetración del campo eléctrico vertical.

2.2.3 Campo eléctrico vertical y la distancia Debye

Como se muestra en [14] el campo eléctrico vertical posee una fuerte relación con el estrechamiento de la distancia Debye. Conforme aumenta el campo eléctrico vertical la distancia Debye se estrecha como se presenta en la Figura 2.1.

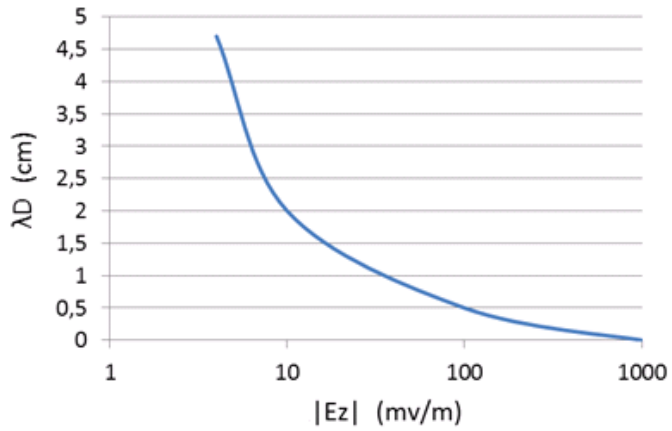

Figura 2.1 Relación entre campo eléctrico atmosférico vertical y la distancia de una esfera Debye [14].

Con el propósito de facilitar la caracterización de la respuesta de la esfera Debye a la presencia de la penetración del campo eléctrico vertical, en [14] se presenta la ecuación (2.9) que viene determinada por las funciones Bessel de primer grado J_n y Neuman Y_n a partir de las ecuaciones de Maxwell.

$$E_z(r) = \left[K_1 J_n\left(\frac{\sigma_0}{\frac{1}{j\omega\xi\mu}} r \right) + K_2 Y_n\left(\frac{\sigma_0}{\frac{1}{j\omega\xi\mu}} r \right) \right] c \tag{2.9}$$

Simplificando la ecuación (2.9) se obtiene la siguiente ecuación donde se considera solo el termino Bessel y el término K_3 contiene todas las demás constantes

$$E_z(r) = -K_3\left(0.25A\frac{r}{\lambda_{D_e}^2} - 1\right) \tag{2.10}$$

La simulación gráfica presentada en la Figura 2.1 se obtuvo de la ecuación anterior (2.10), la cual no solo facilita la caracterización de la respuesta de la esfera Debye a la presencia de la penetración del campo eléctrico vertical sino que será usada en la validación de la hipótesis presentada en esta tesis.

2.3 El Circuito Eléctrico Global

El circuito eléctrico global GEC relaciona el campo eléctrico y la corriente que fluye en la atmósfera inferior, la ionósfera y la magnetósfera formando un condensador esférico gigante con la superficie de la Tierra [22]; [5]; [6]; [7]; [8], que es cargado por las tormentas eléctricas a un potencial de varios cientos de miles de voltios [9] y conduce la corriente vertical a través de la resistencia columnar de la atmósfera (dieléctrico del condensador). La corriente causa una débil electrificación de nubes estratificadas [23] y produce un gradiente de potencial vertical en las capas atmosféricas cercanas a la superficie. Flujos de corriente horizontales se mueven libremente a lo largo de la superficie de la tierra y de la ionósfera; el circuito se cierra con la corriente que fluye desde el suelo a la tormenta y desde la parte superior de la tormenta a la ionósfera y retorna de la ionósfera al suelo a través de la resistencia global de carga de buen tiempo (~100Ω). Diferentes regiones de la atmósfera, incluyendo la ionósfera y la magnetósfera están electromagnéticamente relacionadas [8]. En una tormenta activa la corriente ascendente fluye de la tormenta a la ionósfera, lo que se conoce como la corriente de Wilson. Esta corriente se propaga por todo el mundo a través de la ionósfera/magnetósfera a lo largo de las líneas del campo geomagnético en el hemisferio opuesto. La Figura 2.2 muestra la distribución global de la corriente [9] en la que la corriente vuelve a la superficie de la tierra como la corriente aire-tierra de buen tiempo. Esta figura también muestra la ubicación de las capas relevantes de la atmósfera, que se divide en cuatro regiones acopladas, esto es, tropósfera, atmósfera media, ionósfera y magnetósfera. La orografía de la tierra también se considera [9]. En este diagrama la ionósfera y la magnetósfera son tratadas como los elementos pasivos del circuito. La corriente ascendente desde la superficie de la tierra hasta la parte baja de la nube de tormenta se compone de la corriente dependiente del campo, la corriente de convección, la corriente del rayo, la corriente de precipitación y la corriente de desplazamiento[24].

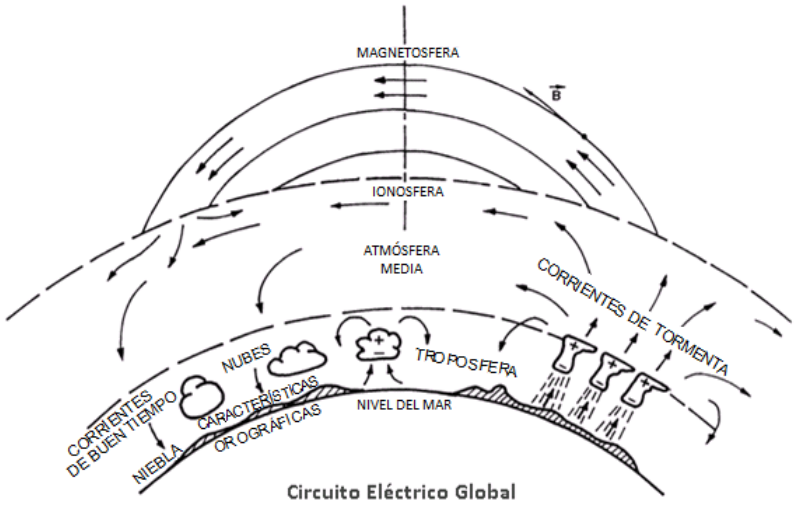

Figura 2.2 Diagrama esquemático de diversos procesos eléctricos en el circuito eléctrico global [9]. El vector B muestra el campo geomagnético de la Tierra, y las flechas muestran la dirección del flujo de corriente en las regiones de los generadores troposféricos, ionosféricos y magnetosféricos [24].

En su forma más simplificada el circuito eléctrico global se puede representar como un circuito eléctrico de primer orden. En la Figura 2.3 se presenta un circuito RC serie donde V es el potencial eléctrico producido por las descargas eléctricas atmosféricas, R es la resistencia interna del generador y C es la capacitancia que se forma entre la ionósfera y la litósfera; se puede observar que el valor de la resistencia modula el valor al que se carga el condensador.

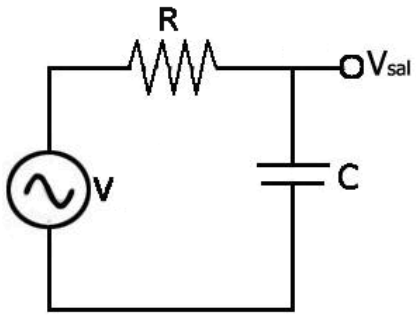

Figura 2.3 Circuito de primer orden RC.

La ecuación diferencial de voltaje que describe la respuesta de este circuito en el tiempo es

$$\frac{dv_C(t)}{dt}+\frac{1}{RC}v_C(t)=\frac{1}{RC}V(t) \tag{2.11}$$

Luego si en vez de tomar R como una resistencia se toma como una conductancia de forma que $R \to 1/G$ donde G es la conductancia, se puede decir entonces que la conductancia modula el valor al que se carga el condensador. De esta manera la ecuación (2.11) se reescribe así

$$\frac{dv_C(t)}{dt}+\frac{G}{C}v_C(t)=\frac{G}{C}V(t) \tag{2.12}$$

Reflejado en la ionósfera, al aumentar la conductividad hay un aumento de la penetración del campo eléctrico vertical [14]. La conductividad aumenta al incrementarse la densidad de electrones y esta última aumenta al tiempo que se desarrolla la tormenta eléctrica [25] [26] como se presenta en la Figura 2.4.

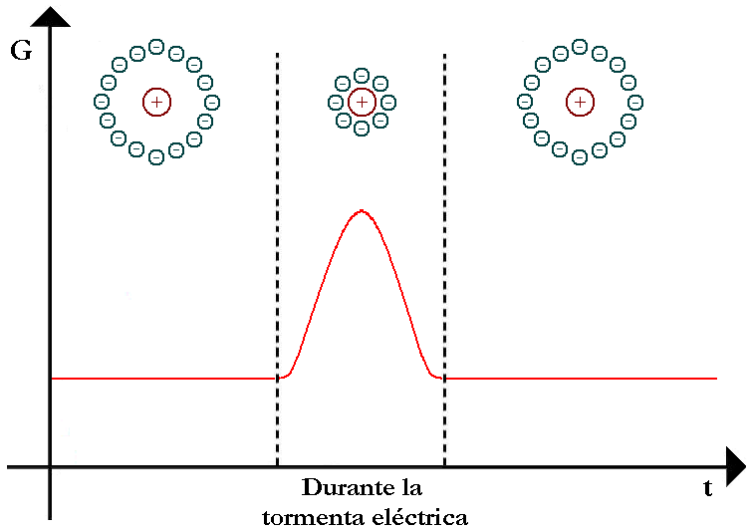

Figura 2.4 Respuesta de la conductancia de la esfera Debye a la tormenta eléctrica

El aumento en la densidad de electrones indica un estrechamiento de la distancia de la esfera Debye; este aumento en la conductividad es el objeto de interés en esta tesis, donde se usa la distancia de una esfera Debye en la ionósfera en el estudio de las perturbaciones causadas especialmente por descargas eléctricas.

2.3.1 Principal generador del Circuito Eléctrico Global: Las Tormentas Eléctricas

La principal fuente de campo eléctrico y corriente en el CEG son las tormentas eléctricas. La corriente proporcionada por las tormentas eléctricas alrededor del planeta mantiene una diferencia de potencial vertical de ~300kV entre la tierra y la ionósfera, con un flujo de corriente de cerca de 10^3 A.

Debajo de la nube, una carga neta negativa es transferida desde la nube de tormenta a la tierra y en la parte superior de la nube una carga positiva es transferida a la atmósfera superior/ionósfera. La separación de carga en el interior de la tormenta eléctrica conduce al desarrollo de enormes potenciales eléctricos.

La actividad de descargas eléctricas se concentra principalmente en tres zonas distintas: Asia Oriental, África Central y América. Alrededor de 200 tormentas eléctricas están activas en todo momento, las cuales se concentran principalmente sobre las masas terrestres tropicales durante las tardes locales y cubren alrededor del 10% de la superficie terrestre [27]. En el 90% restante de la superficie de la tierra, la corriente de retorno ~1000 A (~1 pA m-2) fluye de la ionósfera a la superficie de la tierra, la cual se conoce como corriente de buen tiempo.

2.4 Las descargas eléctricas atmosféricas

El fenómeno físico que se produce para generar el rayo es aún sujeto de estudio, sin embargo se tiene conocimiento de cómo es el mecanismo que produce la descarga y se han clasificado los diferentes tipos de descargas.

"En primera instancia el encendido de la descarga en las nubes de tormenta se produce debido a las colisiones entre partículas de granizo y pequeños cristales de hielo, los cristales de hielo adquieren carga positiva, y se ubican en la parte superior de la nube de tormenta, mientras que las partículas de granizo se cargan negativamente ubicándose en la parte inferior. La estructura eléctrica de una nube de tormenta puede verse esquemáticamente en la Figura 2.5. De esta manera la nube queda con una porción superior de carga positiva y una inferior más o menos igual de carga negativa. En una nube típica se encuentra además una pequeña porción de carga positiva por debajo de la carga negativa principal, donde la temperatura está cerca del punto de congelamiento (0 °C)"[28].

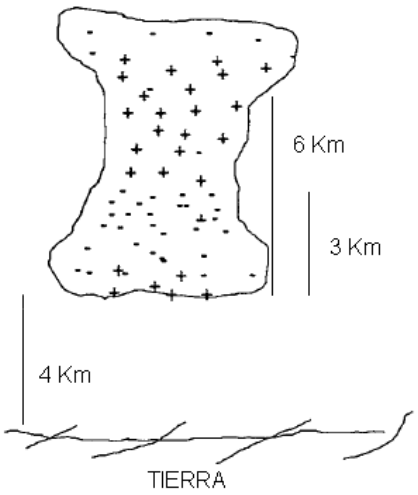

Figura 2.5 Esquema de la distribución de carga en una nube convectiva [29].

En la literatura se presentan diferentes tipos de descargas atmosféricas presentes en tormentas eléctricas [30] y [31], las cuales en general pueden agruparse en dos grandes categorías: aquellas que hacen contacto con tierra, conocidas como descargas nube-tierra (CG) y aquellas que no hacen contacto con tierra, conocidas como descargas intra-nube (IC), nube-nube (CC) y nube-aire (CA).

Como bien se describe Torres [13] "La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva situada debajo de la nube y la carga negativa de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera – es decir, la capacidad de la atmósfera de mantener una separación de cargas eléctricas-, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a 1020 electrones y proporcionará una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillas de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, le energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética (el relámpago visible), energía acústica (el trueno audible) y, finalmente, calor."

A pesar de las diferencias teóricas y experimentales, la mayoría de los investigadores está de acuerdo en que una descarga eléctrica atmosférica se compone de las siguientes cinco etapas [13]:

1. "Encendido de la descarga (Preliminary breakdown): Comienza con la interacción de los centros de cargas en la nube, que termina en una neutralización de cargas y la formación de una columna de carga conocida como el líder escalonado.
2. Líder escalonado (Stepped leader): Se inicia por el encendido de la descarga dentro de la nube, se ve como pasos discretos luminosos que avanzan hacia la tierra, recorriendo distancias aproximadas de 50 m por paso con una duración promedio de 1 μs o menos por paso. Existen pausas entre cada paso del orden de los 50 μs. El líder baja hasta 10 o más culombios de carga hacia tierra en milisegundos con una velocidad promedio de bajada de 200 km/s. La corriente promedio del líder es del orden de 100 a 1000 amperios.
3. Proceso de enlace (Attachment process): Cuando el líder escalonado se encuentra cerca de la tierra, la inducción de cargas eléctricas en objetos puntiagudos (pararrayos, aristas de edificios, antenas) hace que el campo eléctrico en éstos sea lo suficientemente alto como para superar la rigidez dieléctrica del aire (aproximadamente 30 kV/cm), y producir una ionización del aire que se evidencia como una especie de rayos que salen de los objetos, conocidos como líderes ascendentes que van al encuentro del líder escalonado descendente. El momento de conexión se conoce como el Proceso de Enlace. La distancia existente entre la punta del líder escalonado y un objeto que acaba de ser ionizado, se conoce como distancia de incidencia, y esta permite conocer el radio de acción de un pararrayos.
4. Descarga de retorno (Return stroke): Después de producirse el proceso de enlace, el líder se encuentra al mismo potencial de tierra, lo que hace que el canal de la descarga se encuentre completamente ionizado, allí es cuando se produce la primera descarga de retorno que es una onda de campo eléctrico que asciende por el canal del líder escalonado hasta penetrar la base de la nube en la mayoría de los casos y que "baja" de la nube de 2 a 10 culombios de carga con corrientes de hasta 100 kA, siendo esta la parte más energética del rayo que produce mayor iluminación del canal. La primera descarga de retorno produce una corriente cerca de tierra cercana a los 30 kA dependiendo de la latitud donde impacte el rayo, con tiempo a pico de unos pocos microsegundos y alcanzando la mitad del valor pico en unos 50 μs.
5. Líder dardo (Dart leader): Cuando existe carga adicional acumulada en la nube, se presenta un nuevo líder de propagación continua (opuesto al líder escalonado) conocido como el líder dardo que aprovecha en su mayoría el canal ionizado preexistente y deposita un poco menos de carga que el líder escalonado. Puede ocurrir que parte del canal no se encuentre ionizado (la parte baja), por lo que en su camino a tierra el líder busque un camino distinto y se comporte como uno escalonado, recibiendo el nombre de Líder Dardo escalonado. El nuevo líder

prepara el camino para descargas de retorno subsecuentes conocidas como strokes. Un rayo puede tener varios strokes, lo cual define la multiplicidad (el número de descargas por rayo -strokes/flash-), en general los strokes son de menor amplitud que la primera descarga de retorno, siendo su corriente del orden de los 10 a los 15 kA" [28].

2.4.1 Localización y predicción de rayos

Con el propósito de generar alerta de tormenta eléctrica se han desarrollado sistemas de localización de rayos (LLS en inglés). Los LLS modernos son capaces de determinar la ubicación, intensidad y el movimiento de las tormentas en tiempo real, y pueden ayudar a localizar un rayo causante de daños a los recursos y a la infraestructura. Los usuarios típicos de la información de estos sistemas incluyen autoridades de tráfico aéreo y aviación, servicios meteorológicos, entidades de gestión en tierra, servicios forestales, y servicios públicos. Tanto la información de rayos almacenada como la información en tiempo real son usadas también en muchas áreas de investigación geofísica y en aplicaciones forenses y de seguridad [32].

Los rayos son monitoreados desde hace décadas en diferentes partes del mundo, donde se han desarrollado confiables sistemas de localización y detección basados en dos métodos: a) el método MDF (por sus siglas en inglés para búsqueda de dirección magnética) y b) el método TOA (por sus siglas en inglés para tiempo de llegada). Dichos métodos de detección se han desarrollado para un amplio rango de frecuencias, así: a) en la banda de VHF, los sistemas desarrollados en esta banda de frecuencias proveen en detalle información de la descarga y de la tormenta comparados con los sistemas que operan en la banda de LF, pero depende de sensores adicionales y de la complejidad del sistema, además no puede distinguir entre los distintos tipos de descarga debido a que en esta banda de frecuencias, la actividad asociada con las descargas de retorno de las CG es limitada y difícil de detectar y localizar por su baja contribución [13]; b)en la banda VLF/LF, aunque los sistemas de localización no proveen una completa descripción de la distribución espacial de la nube de tormenta (o de las regiones cargadas de una tormenta), el beneficio práctico de estos sistemas es su capacidad para proporcionar información sobre el inicio de la tormenta, además tienen la ventaja de que estas señales se propagan bien a través de terreno montañoso (no hay restricción en línea de vista)[32].

Actualmente los datos de descargas eléctricas atmosféricas recolectados cada vez son más asequibles y precisos, sin embargo esta información requiere de procesamiento

para ser útil en la generación de alerta temprana de tormenta [33]. Varios estudios internacionales han sido desarrollados alrededor de este tema; algunos autores usan la información de descargas CG [34] - [35] donde se deben cruzar con información topográfica e identificar criterios exactos para el lugar donde se desea implementar el sistema generando la alarma poco tiempo (30 seg – 3 min) previo a la ocurrencia del evento; algunos usan la información de descargas IC [36], otros usan la actividad de descargas eléctricas totales de los LLSs [37]; recientemente la medida del campo eléctrico (EF) ha sido introducido dentro de las metodologías para generación de alarma [38] donde usando las descargas eléctricas totales (CG+IC) se evalúa la habilidad de un sistema de generación de alarma para Catalonia (España) basado en umbrales de EF e inversiones de polaridad, encontrando que el criterio de inversión de polaridad del EF para activar la alerta produce mejores resultados que usando simplemente umbrales de EF un tiempo de espera de 8 min contra 6.5 min para umbrales de EF; otros autores usan la información climática como la información de radar y las imágenes satelitales [39] y [40] las cuales se han implementado conjuntamente o por separado.

"El método de predicción más usado en el procesamiento de datos es el método de las dos áreas ("two area method") Figura 2.6 introducido por [35]. Este método define dos áreas concéntricas sobre un punto geográfico llamado Punto de Interés (PI); la primera área que rodea al PI es llamada Área de Preocupación (AOC por sus siglas en ingles), esta región incluye zonas altamente vulnerables ante descargas eléctricas sin notificación previa. La segunda área o área de advertencia (WA por sus siglas en inglés) rodea la AOC. Cuando la actividad atmosférica es reportada sobre la segunda región, la alarma de tormenta eléctrica debe ser activada y las acciones preventivas deben ser iniciadas.

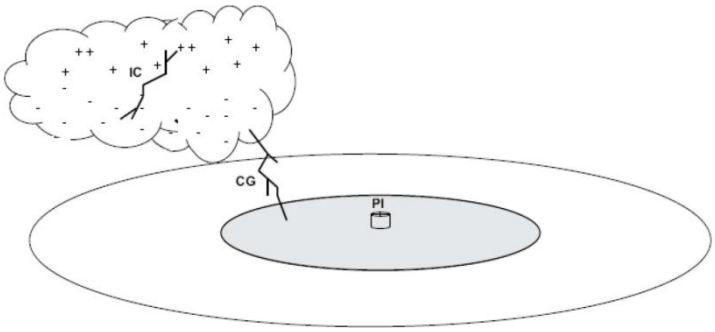

Figura 2.6 Método de las dos áreas [33].

El tamaño y forma de las regiones debe ser ajustado de acuerdo a la eficiencia de detección y la precisión de localización del sistema de detección. Este método ha sido desarrollado para terrenos planos, por lo que su implementación en países como Colombia donde se tienen grandes variaciones de altitud requiere especial atención" [33].

2.5 Conclusiones del capítulo

Cualquier perturbación en el entorno interplanetario o atmosférico provoca una variación en la conductividad eléctrica y por lo tanto una variación en el sistema corriente/campo eléctrico de la atmósfera.

La penetración del campo eléctrico en la ionósfera es modulado por la conductancia.

La densidad de electrones se ve afectada por la intensidad de la tormenta eléctrica, lo que afecta la conductancia en la ionósfera.

La distancia de la esfera Debye medida en la ionósfera se estrecha conforme aumenta la conductancia.

3 MARCO EXPERIMENTAL

Resumen

Los resultados que se presentan se obtuvieron a partir cálculo de la distancia Debye con los valores de densidad y temperatura de electrones medidos en la ionosfera por el satélite DEMETER.

Este capítulo inicia con una revisión de las características del satélite e información general de la base de datos: número de órbitas diarias, instrumentos científicos, modos de operación y culmina con la presentación de los experimentos desarrollados con los datos obtenidos de la base de datos del satélite.

3.1 El satélite DEMETER

DEMETER es un satélite francés dedicado a la investigación de las perturbaciones de la ionósfera de la Tierra debidas a actividad sísmica y volcánica [2].

El satélite DEMETER francés fue lanzado el 29 de junio de 2004. Tiene una órbita heliosincrónica casi circular (10.30LT diurno, 22.30LT nocturno) [41].

La altura de la órbita es de unos 710 km (ajustado a 660 kilómetros al final de 2005), la inclinación orbital es de 98 ° y se toman 14 órbitas por día organizadas en medias órbitas (hacia arriba y había abajo). Los instrumentos científicos realizan medición entre -65 ° y 65 ° de latitud geomagnética [42].

El período de repetición orbital de satélite DEMETER es alrededor de 16 días; es decir, el satélite volverá a examinar la órbita una vez cada 16 días aproximadamente. La distancia entre las órbitas adyacentes es de aproximadamente 2.500 kilómetros en las latitudes bajas [41].

La base de datos del satélite usa coordenadas geocéntricas, en las cuales el plano de referencia es el Ecuador terrestre como se muestra en la Figura 3.1 a continuación, donde se observa el mapamundi con algunas regiones resaltadas en color rojo, las cuales son las zonas sísmicas sobre las cuales el satélite activa el modo ráfaga. También se pueden observar unas líneas color verde y otras color azul las cuales recorren todo el globo, estas son las órbitas; las líneas verdes representan las medias órbitas de bajada

(down o _0) y las líneas azules representan las medias órbitas de subida (up o _1), por lo tanto una órbita completa estará formada por dos medias órbitas, una de subida y una de bajada.

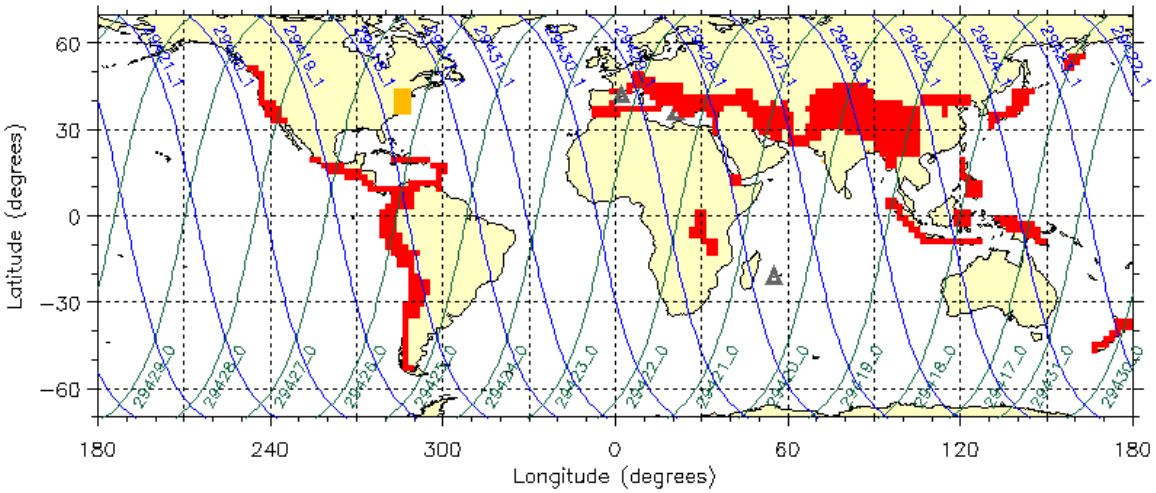

Figura 3.1 Pantallazo orbitas en un día sobre la tierra [2].

Los instrumentos científicos a bordo del satélite son: (ICE) cuatro sensores eléctricos, (IMSC) tres sensores magnéticos, (IAP) un analizador de plasma, (IDP) un detector de partículas energéticas, (ISL) dos sondas de Langmuir y (BANT) una unidad electrónica. Estos instrumentos poseen las siguientes características Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Características de los instrumentos a bordo del satélite DEMETER [43].

Rango de frecuencia B	10 Hz - 18 kHz
Rango de frecuencia E	DC - 3 MHz
Sensibilidad B	1×10^{-5} nT $Hz^{-1/2}$ a 1 kHz
Sensibilidad B	0.2 μV $Hz^{-1/2}$ a 500 kHz
Partículas: electrones	30 keV - 10 MeV
Densidad de Iones	5×10^{2} - 5×10^{6} ions/cm^3
Temperatura de Iones	1000 K - 5000 K
Composición de Iones	H^+, He^+, O^+, NO^+
Densidad de Electrones	10^{2} - 5×10^{6} cm^{-3}
Temperatura de Electrones	500 K - 3000 K

Los instrumentos tienen dos modos principales de trabajo: un modo de ráfaga (adquisición de datos a alta velocidad: 1.6 Mbits/s), que se activa cuando el satélite está sobre zonas sísmicas dadas, y en otros lugares 'no sísmicos' un modo de sondeo (adquisición de datos a baja velocidad: 25 kbits/s) [42].

Los principales objetivos del satélite DEMETER son estudiar las perturbaciones en la ionósfera i) debidas a los efectos sismo-electromagnéticos y ii) debidas a actividades hechas por el hombre como por ejemplo la radiación de armónicos en las líneas de potencia (PLHR), transmisores VLF y estaciones de radio en HF [42].

Los datos a usar en los experimentos son Temperatura de Electrones y Densidad de Electrones medidos por las sondas de Langmuir, con los cuales se calculará la distancia Debye que se propone como posible indicador de actividad eléctrica en la ionósfera debida a tormentas eléctricas.

3.2 Experimentos

Con el fin de dar respuesta a los objetivos propuestos se realizaron los siguientes experimentos, todos ellos con la información recopilada por el satélite DEMETER asociada a una variable en un área y una ventana de tiempo determinadas.

3.2.1 Experimento #1: Conexión de la distancia Debye y días tormentosos

Tomando como base la información del modelo temporal del fenómeno eléctrico atmosférico presentado por Horacio Torres en su libro titulado El Rayo Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología [13], donde escribe: "El modelamiento del clima es un proceso complejo, debido a la naturaleza no lineal y aleatoria de relaciones entre los factores que intervienen y a la cantidad de ellos que se involucran en los modelos climatológicos. Sobre la base de consideraciones climatológicas, la información disponible en Colombia de datos confiables de variables meteorológicas y los análisis de cambio climático global, se examinaron las siguientes variables:

- Número de días mensuales de precipitación (días con lluvia superior o igual a 0.1 mm).
- Número de días tormentosos mes (días en los cuales un trueno es oído y un relámpago visto).

La zona de estudio escogida fue la Sabana de Bogotá (latitud: 04º 43' N; longitud: 74º 09' W; altitud: 2547 m) y el período comprendido entre enero de 1972 y diciembre de 1990"

Se presenta entonces la oportunidad de correlacionar como lo muestra este modelo los parámetros de número de días tormentosos-mes y la distancia Debye sobre Bogotá. Esta última se propone como parámetro de estudio ya que por definición es una variable que se ve afectada por cambios en la densidad y en la temperatura de los electrones, los cuales pueden ser causados por tormentas eléctricas.

3.2.1.1 Objetivo del Experimento #1

Asociar la variación de la distancia Debye en la ionosfera respecto del promedio multianual mensual de días tormentosos en el área de la ionósfera sobre la ciudad de Bogotá D.C. para el año 2008.

3.2.1.2 Procedimiento específico del Experimento #1

Teniendo los datos seleccionados como se muestra en el Anexo A, se define el rango de coordenadas para realizar el filtro fino de la información descargada desde la base de datos del satélite DEMETER. Este cálculo se realiza primero teniendo las coordenadas geográficas de la ciudad para luego calcular su cambio a coordenadas geocéntricas las cuales son usadas por el satélite DEMETER; para el caso de Bogotá el rango de coordenadas geocéntricas es: latitud 4.21-5.21 grados y longitud 285.35 – 286.35 grados.

Con la información de densidad y temperatura de electrones proporcionada por el instrumento ISL del satélite DEMETER se calcula luego la distancia Debye Ecuación (2.8), de esta manera se obtienen los valores con los que se realiza la gráfica de distancia Debye (cm) vs Mes.

Finalmente se comparan las curvas de las variables estudiadas, pero para efectos prácticos no se tienen en cuenta las unidades propias de cada variable.

3.2.1.3 Desarrollo del Experimento #1

Habiendo realizado tanto el procedimiento general y el procedimiento propio de este experimento, se obtiene la gráfica de distancia Debye Figura 3.2 para el área de la ionósfera sobre la ciudad de Bogotá. Se puede observar que hay tres meses en el año (abril, mayo y septiembre) donde no se obtuvo lectura por parte del satélite, esto debido al filtro fino de coordenadas. Se observa que la distancia Debye tiene variaciones significativas para los meses en los cuales se obtuvo lectura por parte del satélite. En el primer grupo comprendido por los meses de enero, febrero y marzo se observa un decremento casi lineal desde los 4 cm hasta los 2.7 cm aproximadamente. En el

segundo grupo comprendido por los meses de junio, julio y agosto, y en el tercer grupo comprendido por los meses de octubre, noviembre y diciembre, se observa que la distancia Debye forma pequeños picos que varían aproximadamente 1 cm.

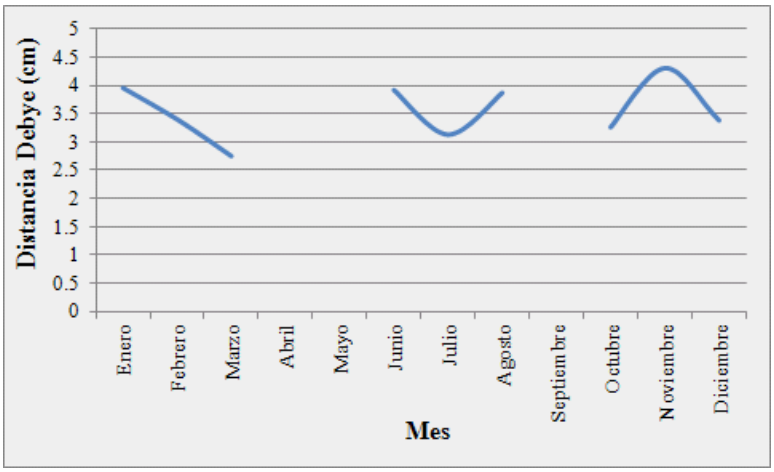

Figura 3.2 Promedio mensual de distancia Debye para el año 2008.

En la Figura 3.3 se presenta el promedio multianual de días tormentosos – mes, "que revela un desarrollo estacional bimodal, propio de la estación meteorológica ubicada en la zona central andina de Colombia." [13].

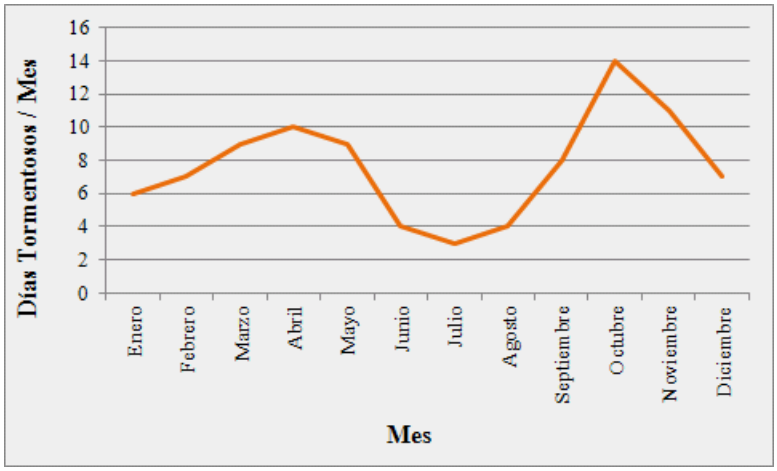

Figura 3.3 Promedio multianual mensual de días tormentosos-mes [13].

Llama la atención el comportamiento inverso presente entre la distancia Debye y el promedio multianual mensual de días tormentosos-mes, el cual se presenta de forma gráfica en la Figura 3.4 y donde se resaltan tres tramos principalmente: el primer tramo se compone de los meses de enero – febrero y marzo, el segundo tramo se compone de los meses de abril – mayo y junio, y el tercer tramo lo componen los meses de julio – agosto y septiembre.

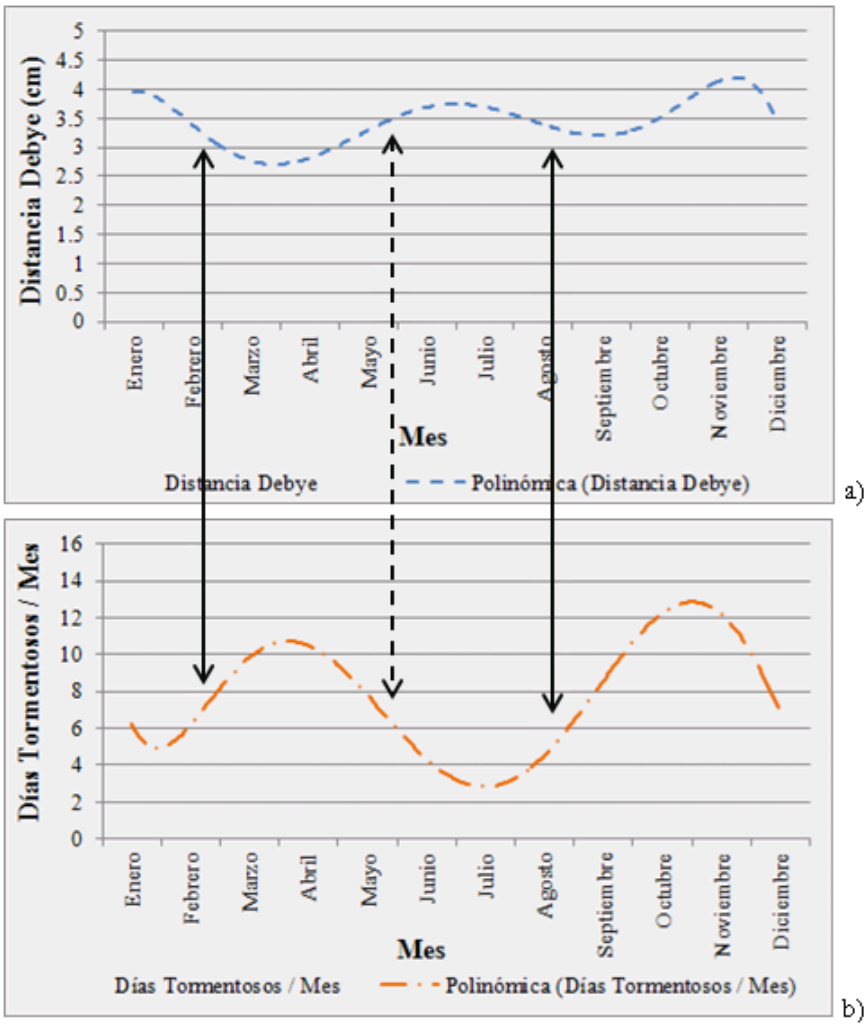

Figura 3.4 Comparación gráfica entre a) la tendencia de la Distancia Debye y b) la tendencia del Promedio multianual mensual de días tormentosos-mes.

Las líneas verticales superpuestas entre las Figuras 3.4 a) y 3.4 b) resaltan la tendencia inversa entre la distancia Debye y el promedio multianual mensual de días tormentosos-mes; las líneas verticales sólidas resaltan el primer y el tercer tramo, donde conforme aumenta el promedio multianual mensual de días tormentosos – mes la distancia Debye disminuye; inverso al comportamiento resaltado por la línea vertical punteada sobre el segundo tramo, donde al disminuir el promedio multianual mensual de días tormentosos – mes la distancia Debye aumenta.

3.2.1.4 Conclusión del Experimento #1

Con base en las figuras antes comparadas de forma gráfica se puede decir que existe una conexión fuerte entre el promedio multianual mensual de días tormentosos–mes y la distancia Debye medida en la ionosfera.

Si bien se presenta en [13] que el rango horario donde se presenta un máximo de rayos para Bogotá es entre 15:00 y 16:00 hora local, esto no fue impedimento para que se encontrara una gran variabilidad en el promedio de la distancia Debye medida en la ionósfera.

3.2.2 Experimento #2: Conexión de la distancia Debye y el daño de medidores de energía

Tomando como base los resultados del estudio realizado por Oscar Soto con los medidores retirados de la empresa prestadora del servicio eléctrico para el nororiente de Caldas, donde "el procesamiento de la información permitió la identificación de las fortalezas y las debilidades del proceso de diagnóstico de los medidores de energía implementado.

El análisis forense mostró que el sensor de voltaje fue el elemento que más falló en los contadores electrónicos (68%), y la bobina de voltaje fue el elemento que más falló en los contadores electromecánicos (79%). Como resultado, se puede determinar que la causa más frecuente de fallo es sobretensión.

Basado en el análisis de la información, se determinó que la tasa de fallo más alta de medidores de energía se limita a un área específica de la parte oriental. Por lo tanto, la implementación de medidas correctivas sólo a esta área logrará una reducción significativa en la tasa de fallo de los medidores de energía."[44].

3.2.2.1 Objetivo del Experimento #2

Asociar la variación de la distancia Debye en el área de la ionosfera sobre Samaná – Caldas con el número de medidores retirados cuya causa de daño se catalogó como sobretensión en el mismo lugar para los años 2008 y 2009.

3.2.2.2 Procedimiento específico del Experimento #2

Teniendo los datos seleccionados como se muestra en el Anexo A, se define primero el rango de coordenadas geocéntricas con el cual se va realizar el filtro fino sobre la información proporcionada por la base de datos del satélite DEMETER a partir de las coordenadas geográficas; para el caso de Samaná el rango de coordenadas es: latitud 4.82 – 5.82 grados y longitud 285 – 286 grados.

Con la información de densidad y temperatura de electrones para los años 2008 y 2009 proporcionada por el instrumento ISL del satélite DEMETER se calcula luego la distancia Debye Ecuación (2.8), de esta manera se obtienen los valores con los que se realiza la gráfica de distancia Debye (cm) vs Mes.

La información de fallo de medidores se procesa de manera similar. Con la información completa proporcionada por la empresa prestadora del servicio eléctrico, se seleccionan solo los medidores retirados cuya causa de fallo se catalogó como sobretensión. Con estos datos se realiza una gráfica de Número de medidores retirados 'sobretensión' vs Mes.

Finalmente se comparan las curvas de las variables estudiadas, pero para efectos prácticos no se tienen en cuenta las unidades propias de cada variable.

3.2.2.3 Desarrollo del Experimento #2

Habiendo realizado el procedimiento general y el procedimiento específico propio de este experimento, se obtiene la gráfica de distancia Debye Figura 3.5 para el área de la ionósfera sobre el pueblo de Samaná – Caldas. Se observa en primera instancia que por el filtro de coordenadas seleccionado se tienen varios meses en los cuales no se obtuvo lectura de datos por parte del satélite; de 24 meses se obtuvo lectura de datos para 15 meses. También se observa claramente que este parámetro tiene un valor variable conforme pasan los meses; para los tres primeros meses de los años en cuestión se observan valores de distancia Debye que decrecen conforme pasan los meses teniendo su punto de inicio en enero hasta mayo, aunque con la información de abril de 2009 podemos observar que esta tendencia se podría conservar incluso un cuarto mes. En cuanto a los meses de junio y julio de ambos años se puede observar como estos valores son bastante diferentes; mientras para el año 2008 se observan casi constantes, para el año 2009 se observa que son los dos meses con los valores más altos de todo el periodo de estudio tomando un valor máximo en el mes de julio.

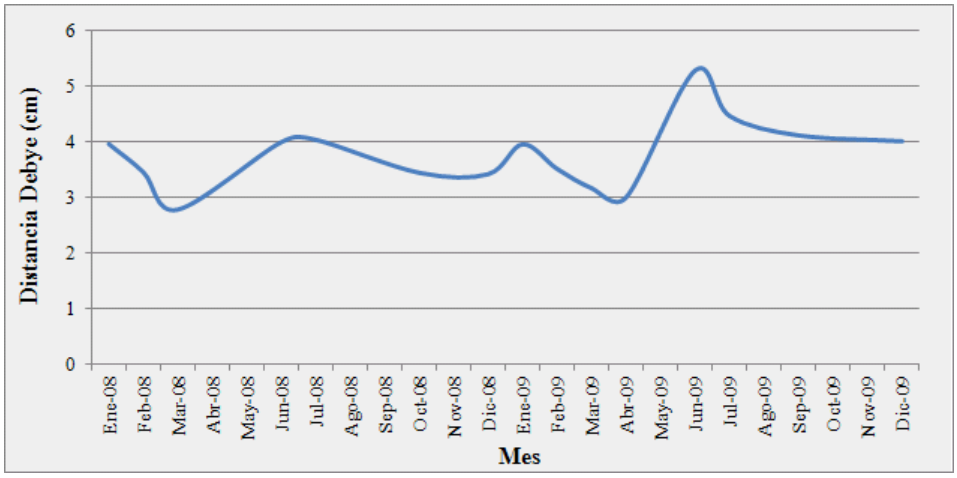

Figura 3.5 Promedio mensual de distancia Debye para los años 2008 – 2009.

En la Figura 3.6 se presenta el número de medidores retirados para los años 2008 y 2009 cuya causa de fallo se catalogó como sobretensión. Se puede observar la gran cantidad de medidores dañados en el año 2008 en comparación con los valores bajos en el año 2009, especialmente en los meses de Enero, Marzo, Junio y Julio. En el primer trimestre del año 2008 se concentra el mayor número de medidores retirados, y se observa que para los mismos meses del año 2009 el valor de medidores retirados es mucho menor; hay que resaltar que para el mes de febrero en ambos años el valor de medidores es alto, siendo el del 2009 el más alto de todo el año. Para los meses de junio y julio se presenta un contraste; en el año 2008 el número de medidores retirados es alto (entre 10 y 20) mientras para el año 2009 el número es bajo (entre 0 y 5).

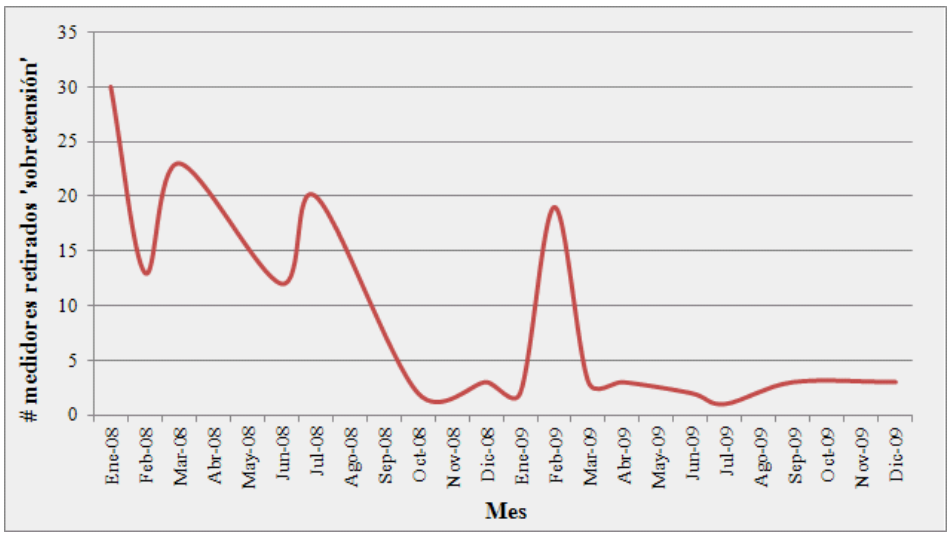

Figura 3.6 Número de medidores retirados en Samaná – Caldas cuya causa fallo se catalogó como sobretensión para los años 2008 – 2009, según datos empresa prestadora del servicio.

Llama la atención el comportamiento inverso presente entre la distancia Debye y el Número de medidores retirados cuya causa fallo se catalogó como sobretensión, el cual se presenta de forma gráfica en la Figura 3.7 y donde se resaltan cuatro tramos principalmente: el primer tramo lo comprenden los meses de Enero – Febrero y Marzo de 2008 donde se presenta gran cantidad de medidores retirados, el segundo tramo lo comprenden los meses de Junio – Julio y Agosto de 2008 donde se presenta un aumento considerable de medidores retirados, el tercer tramo lo conforman los meses de Enero – Febrero y Marzo de 2009 donde se presenta un gran aumento de medidores retirados y finalmente, el cuarto tramo lo conforman los meses de Mayo – Junio y Julio de 2009 donde se presentan valores bajos de medidores retirados.

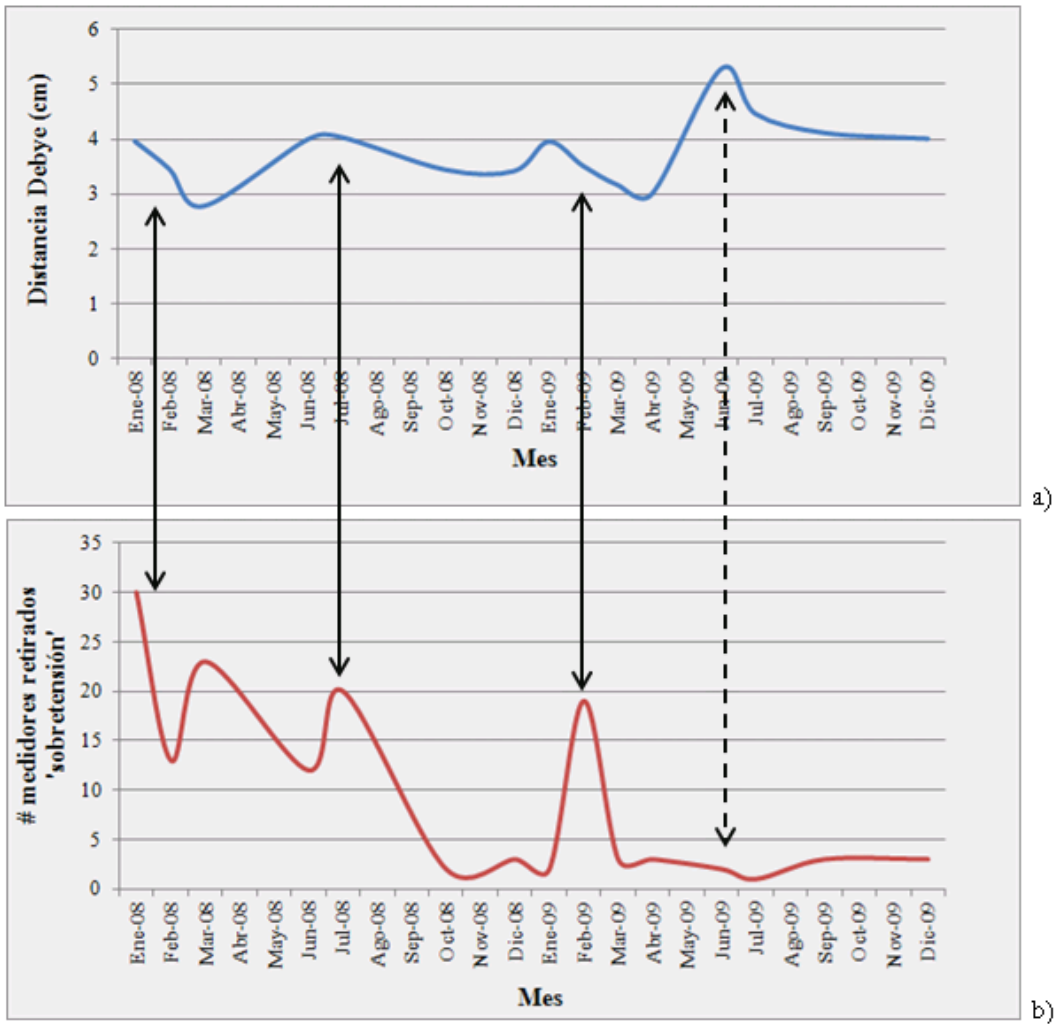

Figura 3.7 Comparación gráfica entre a) la Distancia Debye y b) el Número de medidores retirados cuya causa de fallo se catalogó como sobretensión.

Las líneas verticales superpuestas entre las Figuras 3.7 a) y 3.7 b) resaltan el comportamiento inverso entre ambas variables; las líneas verticales sólidas superpuestas sobre el primer, segundo y tercer tramo destacan que para valores altos de número de medidores retirados la distancia Debye presenta una disminución; inverso al comportamiento indicado por la línea vertical punteada superpuesta sobre el cuarto tramo, donde se tiene un valor muy bajo de medidores retirados y la distancia Debye aumenta encontrando allí su valor más alto.

3.2.2.4 Conclusión del Experimento #2

Con base en las figuras antes comparadas de forma gráfica se puede decir que existe una conexión visible entre la distancia Debye medida en la ionósfera y el número de medidores retirados cuya causa de fallo se catalogó como sobretensión.

3.2.3 Experimento #3: Conexión de la distancia Debye y las descargas eléctricas atmosféricas

En muchos países los rayos son una de las principales causas de lesiones y muerte de personas relacionadas con el clima. En Colombia se calcula, a partir de los informes en los medios de comunicación que alrededor de 100 personas al año mueren por un rayo y el número de heridos podría estar cerca de 1000 [38].

3.2.3.1 Objetivo del Experimento #3

Asociar la variación de la distancia Debye en la ionosfera respecto del número total de rayos detectados sobre el área de la ciudad de Manizales – Caldas para el año 2009.

3.2.3.2 Procedimiento específico del Experimento #3

Teniendo los datos seleccionados como se muestra en el Anexo A, se define primero el rango de coordenadas geocéntricas con el cual se va realizar el filtro fino sobre la información proporcionada por la base de datos del satélite DEMETER a partir de las coordenadas geográficas; para el caso de Manizales el rango de coordenadas es: latitud 4.53 – 5.53 grados y longitud 284.21 – 285.21 grados.

Con la información de densidad y temperatura de electrones para el año 2009 proporcionada por el instrumento ISL del satélite DEMETER se calcula luego la distancia Debye Ecuación (2.8), de esta manera se obtienen los valores con los que se realiza la gráfica de distancia Debye (cm) vs Fecha(dd.mm.aaaa).

Teniendo las fechas en las que el satélite realizó lectura se procede a obtener el número total de rayos detectados por la red WWLLN (World Wide Lightning Location

Network) para la misma zona geográfica, de aquí se obtienen los valores con los que se realiza la gráfica de Número total de rayos vs Fecha (dd.mm.aaaa).

Finalmente se comparan las curvas de las variables estudiadas, pero para efectos prácticos no se tienen en cuenta las unidades propias de cada variable.

3.2.3.3 Desarrollo del Experimento #3

Habiendo realizado el procedimiento general y el procedimiento específico propio de este experimento, se obtiene la gráfica de distancia Debye Figura 3.8 para el área de la ionósfera sobre la ciudad de Manizales – Caldas. Aunque las lecturas no son diarias, se puede observar que si poseen una tendencia. En el caso de las lecturas realizadas por el satélite DEMETER en el mes de febrero se observa que forman un pico de subida en la lectura de mediados del mes, de la misma manera para las lecturas realizadas en el mes de mayo donde los valores de distancia Debye forman un pico de bajada en la lectura de mediados del mes y posee uno de los valores más altos de toda la gráfica en la lectura de fin de mes. Para las lecturas realizadas en el mes de octubre se observa que los dos primero poseen un valor casi constante y en el valor de distancia Debye de fin de mes se tiene uno de los valores más bajos. Siguiendo con las lecturas del mes de noviembre se observa que decrecen constantemente hasta alcanzar el valor más bajo de toda gráfica en la primer lectura del mes de diciembre. En la lectura realizada por el satélite en el mes de junio se obtuvo el valor más alto de distancia Debye.

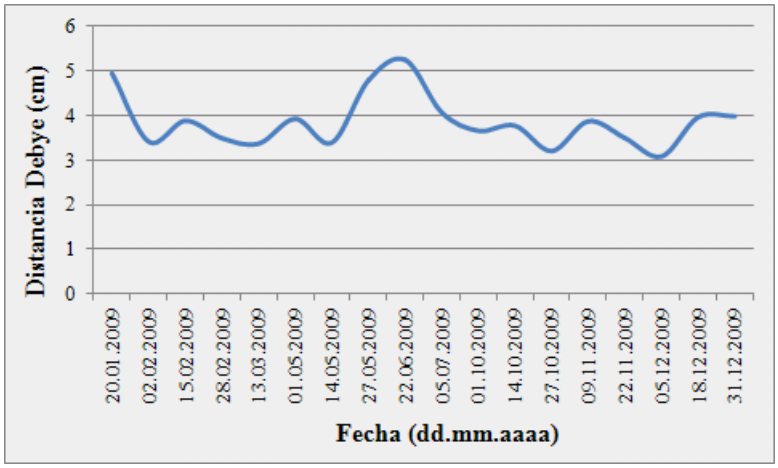

Figura 3.8 Distancia Debye para el año 2009.

En la Figura 3.9 se presenta el Número total de rayos detectados sobre Manizales en las mismas fechas seleccionadas en el cálculo de distancia Debye.

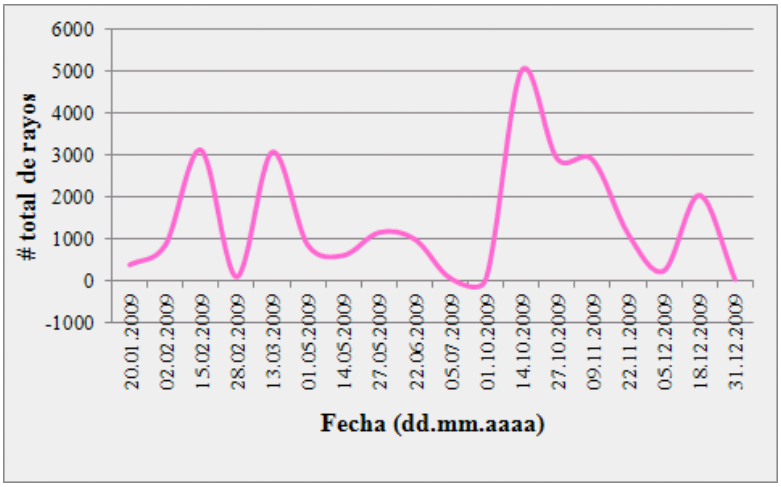

Figura 3.9 Número total de rayos detectados por la red WWLLN (World Wide Lightning Location Network) para el año 2009 en las fechas seleccionadas.

Para las primeras lecturas se observan valores de rayos detectados que van en aumento hasta alcanzar los valores más altos de la gráfica. Se observa que en las fechas centrales de la gráfica se concentran valores bajos de rayos detectados, esto sería las lecturas entre el 01.05.2009 y el 01.10.2009. Para las lecturas finales, esto sería a partir de la fecha 14.10.2009 se observan valores altos de rayos detectados que tienden al descenso finalizando el año. El valor más alto de rayos detectados se obtuvo en la lectura del 14.10.2009.

Llama la atención el comportamiento inverso presente entre la distancia Debye y el Número total de rayos, el cual se presenta de forma gráfica en la Figura 3.10 y sobre la cual se resaltan cuatro tramos principalmente: el primer tramo formado por los primeros tres días de muestra (20.01.2009 – 02.02.2009 – 15.02.2009), el segundo tramo formado por los siguientes seis días de muestra (del 28.02.2009 hasta el 22.06.2009), el tercer tramo lo forman los siguientes cinco días de muestra (del 05.07.2009 hasta el 09.11.2009) y finalmente, el cuarto tramo formado por los últimos cuatro días de muestra (del 22.11.2009 hasta el 31.12.2009).

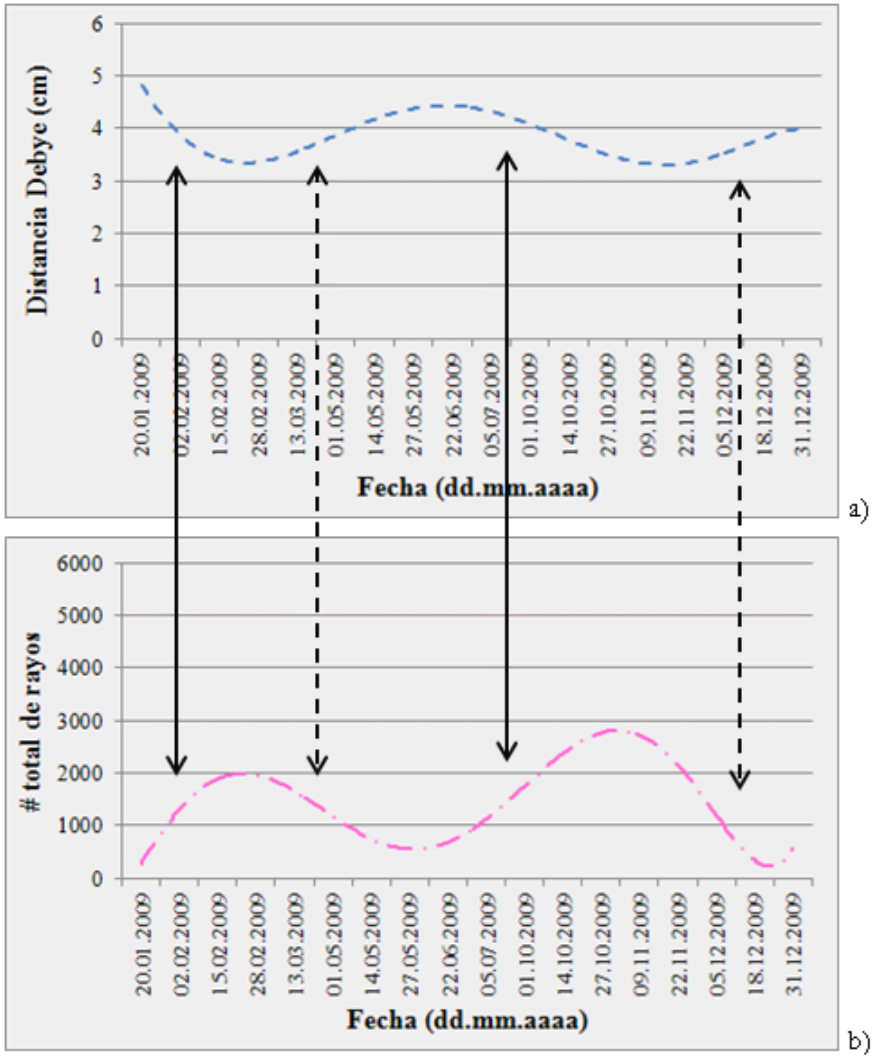

Figura 3.10 Comparación gráfica entre a) la tendencia de la Distancia Debye y b) la tendencia del Número total de rayos.

Las líneas verticales superpuestas entre las Figuras 3.10 a) y 3.10 b) resaltan claramente la tendencia inversa entre la distancia Debye y el Número total de rayos; las líneas verticales sólidas resaltan el primer y tercer tramo, donde conforme aumenta el Número total de rayos la distancia Debye disminuye; inverso al comportamiento destacado en el segundo y cuarto tramo por las líneas verticales punteadas, donde al disminuir el Número total de rayos la distancia Debye aumenta.

3.2.3.4 Conclusión del Experimento #3

Con base en las figuras antes comparadas se puede decir que existe una conexión fuerte entre la distancia Debye medida en la ionosfera y el Número total de rayos detectados sobre Manizales.

3.2.4 Experimento #4: Conexión de la distancia Debye y la precipitación de lluvias

"En Colombia, la ocurrencia de desastres producto de eventos hidrometeorológicos de gran magnitud ocupa el primer lugar: 8724 reportes de inundaciones, 5523 reportes de deslizamientos y 696 avenidas torrenciales, siendo en total el 95.96% de los eventos de desastre reportados entre 1970 y 2006. La ciudad de Manizales históricamente ha sido una ciudad donde las lluvias han predominado, siendo esto propio de su condición de ciudad de media montaña andina. Adicionalmente, su topografía, conformada por pendientes fuertes, y sus suelos, de origen volcánico, hacen de Manizales un lugar donde los deslizamientos han ido de la mano de las fuertes lluvias" [3].

"En la década de los 90, la Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la empresa metropolitana de aseo - EMAS, instala la primera estación para la transmisión de datos meteorológicos, en el relleno sanitario de Manizales. Esto se da gracias a los avances alcanzados por el grupo de trabajo académico en ingeniería hidráulica y ambiental, que viene trabajando en el tema desde la década de los 80. Posteriormente se instala otra estación en el edificio de Posgrados de la sede de la Universidad Nacional, creando así la primera red de monitoreo de la ciudad.

Con esta red conformada por dos estaciones, fue posible suscribir un convenio con la alcaldía de Manizales para el montaje de una red telemétrica automática, asociada a la prevención de desastres para la ciudad1. De esta manera se ha ido densificando la red de monitoreo, conformada para el año 2008 por 11 estaciones que se han venido instalando a lo largo de más de diez años de funcionamiento.

La información de las estaciones es recolectada cada cinco minutos sobre ocho variables meteorológicas: Temperatura, Precipitación, Radiación Solar, Humedad Relativa, Velocidad y Dirección del Viento, Presión Barométrica y Evapotranspiración" [45].

3.2.4.1 Objetivo del Experimento #4

Asociar la variación de la distancia Debye en la ionosfera respecto de la precipitación de lluvias en el área de la ionosfera sobre la ciudad de Manizales - Caldas para el periodo 2006 - 2008.

3.2.4.2 Procedimiento específico del Experimento #4

Haciendo uso del rango de coordenadas propuesto en el experimento anterior (3.2.3.2) donde se exploró la correlación de la distancia Debye con el número de rayos sobre la ciudad de Manizales, y la información del instrumento ISL del satélite DEMETER se realiza el cálculo de la distancia Debye Ecuación (2.8) usando la densidad y la temperatura de electrones para el periodo 2006 - 2008, de esta manera se obtienen los valores con los que se realiza la gráfica de distancia Debye (cm) vs Fecha (dd.mm.aaaa).

Luego haciendo uso de la base de datos de la red de monitoreo de estaciones hidrometeorológicas de la ciudad de Manizales la cual es administrada por el Instituto de Estudios Ambientales – IDEA de la Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales, se selecciona la variable de precipitación de lluvias y se calcula el promedio. De esta manera se obtienen los valores con los que se realiza una gráfica de Precipitación (mm) y Fecha (dd.mm.aaaa).

Finalmente se comparan las curvas de las variables estudiadas, pero para efectos prácticos no se tienen en cuenta las unidades propias de cada variable.

3.2.4.3 Desarrollo del Experimento #4

Habiendo realizado el procedimiento general y el procedimiento específico propio de este experimento, se obtiene la gráfica de distancia Debye Figura 3.11. Se observa en la gráfica como el valor de la distancia Debye muestra grandes variaciones en las lecturas de los años estudiados. Para el las lecturas de los cinco primeros meses de cada año resaltan especialmente unos marcados descensos en el valor de distancia Debye, esto se puede observar para las lecturas del año 2006 donde los valores alcanzan el valor más bajo de toda la gráfica y en menor cuantía pero con el mismo comportamiento en el año 2008, mientras que para el año 2007 los valores de distancia Debye varían poco menos de 1 cm y se conservan cerca de la media de los valores de toda la gráfica. No se presenta en esta gráfica un valor máximo significativo.

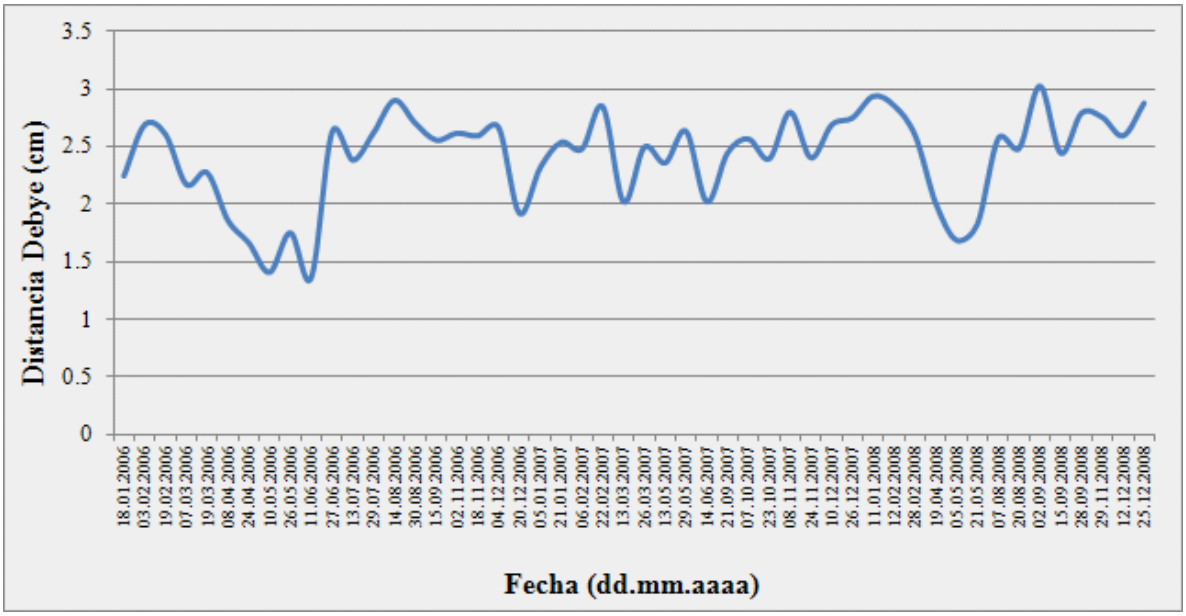

Figura 3.11 Distancia Debye calculada con los datos del satélite DEMETER.

En la Figura 3.12 se presenta el promedio diario de precipitación de lluvias sobre la ciudad de Manizales en las mismas fechas seleccionadas en el cálculo de la distancia Debye.

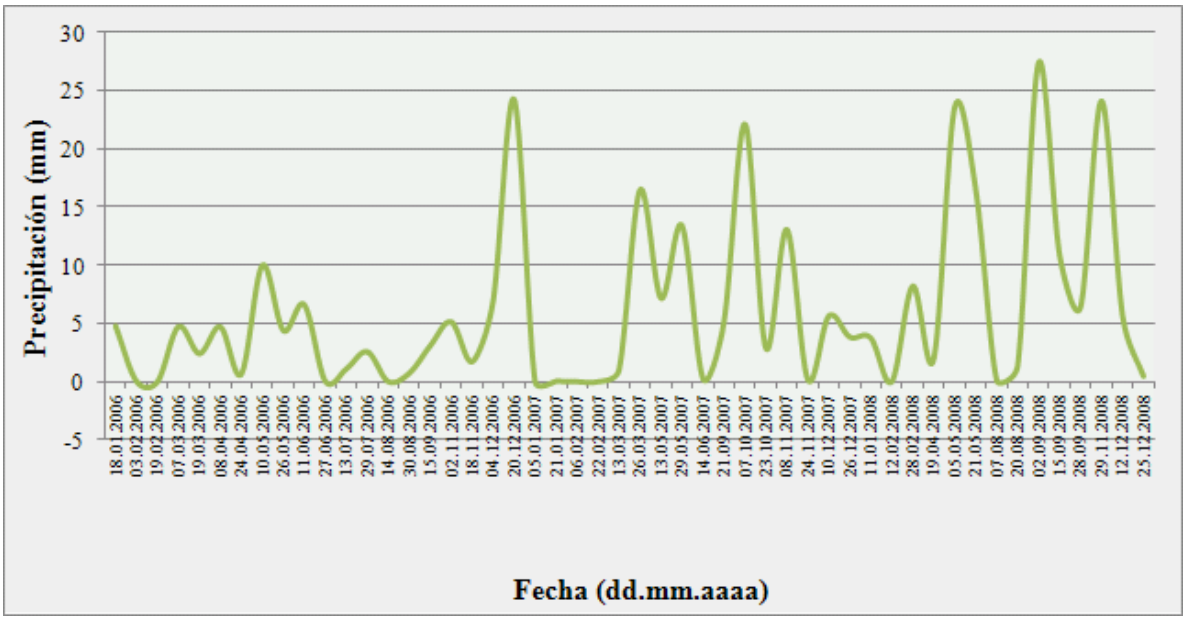

Figura 3.12 Promedio de precipitación diaria según datos del IDEA.

Se observa que en general para las fechas seleccionadas del año 2006 los valores de precipitación se mantuvieron por debajo de los 10 mm. Para las fechas seleccionadas de los años 2007 y 2008 los valores de precipitación fueron variables con valores desde 0

hasta 27 mm de lluvia aproximadamente. El máximo valor de precipitación se obtuvo en la lectura de la fecha del 02.11.2008.

Llama la atención el comportamiento inverso entre la distancia Debye y la precipitación, el cual se presenta de forma gráfica en la Figura 3.13.

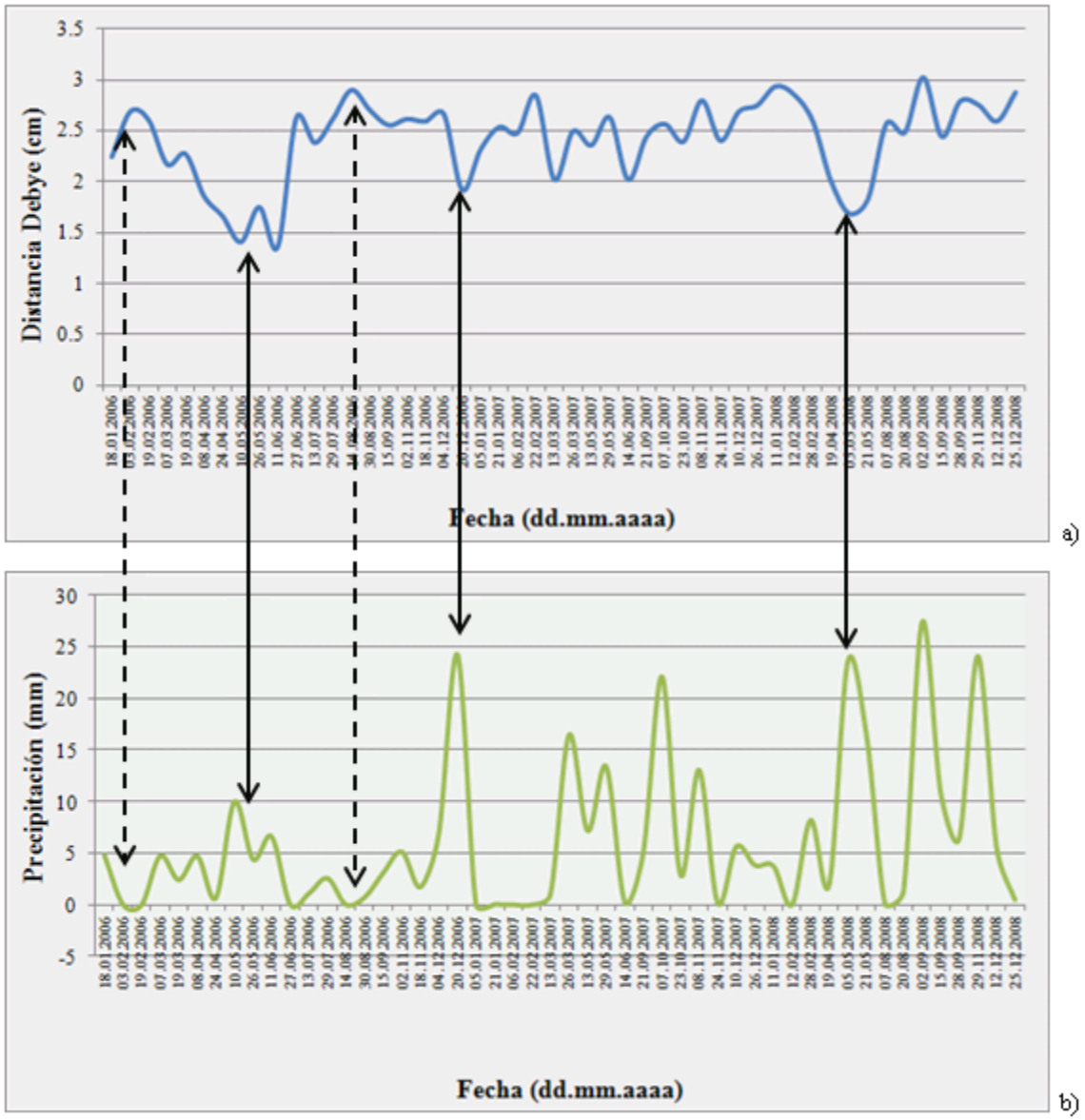

Figura 3.13 Comparación gráfica entre a) la Distancia Debye y b) la Precipitación de lluvias.

Las líneas verticales superpuestas entre las Figuras 3.13 a) y 3.13 b) resaltan el comportamiento inverso entre la distancia Debye y la precipitación; las líneas verticales sólidas hacen notar que para valores altos de precipitación la distancia Debye presenta una disminución; inverso al comportamiento indicado por las líneas verticales

punteadas, donde se observa que para valores muy bajos de precipitación de lluvias la distancia Debye aumenta.

Aunque no se observa esta conexión en todos las lecturas, si se puede observar que es una característica predominante este comportamiento. Las posibles explicaciones para no observarse esta conexión inversa en varios días estudiados pueden ser las diferentes tipos de precipitación: por ejemplo la precipitación convectiva, la cual se caracteriza por ser corta e intensa y fácilmente puede no ser detectada la perturbación ionosférica por el satélite al ser de corta duración.

3.2.4.4 Conclusión del Experimento #4

Con base en las figuras antes comparadas se puede decir que existe una conexión visible entre la distancia Debye medida en la ionosfera y Precipitación de lluvias sobre Manizales.

Se requiere de un estudio más detallado de las variables físicas que intervienen en el cálculo de la distancia Debye.

3.2.5 Experimento #5: Conexión de la distancia Debye y la precipitación con la entropía del campo eléctrico

"La entropía aproximada es una cuantificación de la regularidad y la complejidad estadística, que tiene muchas aplicaciones potenciales para una amplia variedad de áreas con series de longitud relativamente corta (de más de 100 puntos)." [14]

"MSE es una herramienta que permite evaluar la serie de tiempo en escalas superiores. La Entropía Multiescala ha sido ampliamente utilizada en el estudio de señales fisiológicas. Una importante característica del MSE es que puede diferenciar señales como el ruido rosa (o 1/f), presente en una gran cantidad de fenómenos como terremotos, comportamiento de la bolsa, distribución de montañas, etc. Las escalas superiores ayudaran a obtener una evaluación más exhaustiva de las irregularidades de la señal."[46]

3.2.5.1 Objetivo del Experimento #5

Asociar la variación de la entropía del campo eléctrico en varias bandas de frecuencia en el área de la ionosfera sobre la ciudad de Manizales - Caldas para seis días de muestra del año 2008 con la precipitación de lluvias y la distancia Debye.

3.2.5.2 Procedimiento específico del Experimento #5

Se seleccionaron 6 días de los 50 estudiados entre 2006 – 2008 en el experimento anterior (3.2.4) donde la variación de la distancia Debye tiene un comportamiento particularmente llamativo, para realizar un estudio más detallado utilizando otra herramienta: la Entropía Múltiescala - MSE.

Con la información del número de órbita de los días de muestra seleccionados se procede a descargar la información del instrumento ICE de campo eléctrico en los diferentes rangos de frecuencia que ofrece el experimento los cuales son definidos así: DC / ULF [0-15 Hz], ELF [15 Hz-1 kHz], VLF [15 Hz-17.4 kHz] and HF [10 kHz-3.175 MHz] [2].

Haciendo uso del rango de coordenadas propuesto se procede a seleccionar los paquetes de datos que se usarán para ser procesados con el software de Entropía Multiescala – MSE [47]. Este cálculo permitirá obtener información más detallada del comportamiento de la ionósfera.

Con esta información se realizó una gráfica de Entropía (nats) vs Fecha (dd.mm.aaaa).

3.2.5.3 Desarrollo del Experimento #5

Habiendo realizado el procedimiento general y el procedimiento específico propio de este experimento, se obtiene la gráfica del promedio de entropía para 20 escalas Figura 3.14 en las diferentes frecuencias proporcionadas por la base de datos del satélite DEMETER. Para el campo eléctrico en ULF se presenta un valor bajo de entropía en la fecha 28.02.2008 respecto de los valores de entropía obtenidos en el resto de las fechas; este comportamiento no muestra relación con los valores de precipitación o de distancia Debye. Para el campo eléctrico en ELF aunque la variación entre los valores es más suave, el comportamiento tampoco muestra relación con los valores de precipitación o de distancia Debye. Para el campo eléctrico en VLF el comportamiento de la curva no muestra relación con los valores de precipitación o de distancia Debye aunque presenta los dos valores más altos de entropía en toda la gráfica 12.02.2008 y 05.05.2008. Se observa que el campo eléctrico en HF tiene un comportamiento parecido de la curva de distancia Debye para las mismas fechas por lo que la atención se centra en este rango de frecuencia.

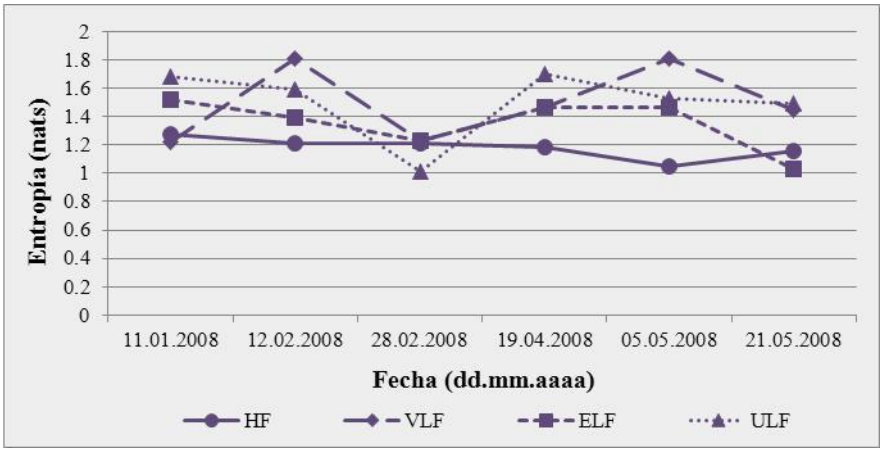

Figura 3.14 Promedio de 20 escalas de entropía calculada con el software de MSE para el campo eléctrico en diferentes bandas de frecuencia.

En la Figura 3.15 se presenta el promedio de 20 escalas de entropía para el campo eléctrico en la banda de alta frecuencia HF. Con el propósito de hallar la relación matemática se generó para esta curva la ecuación de la línea de tendencia. De igual manera se generaron las ecuaciones de la línea de tendencia para la distancia Debye Figura 3.16 y para la precipitación Figura 3.17.

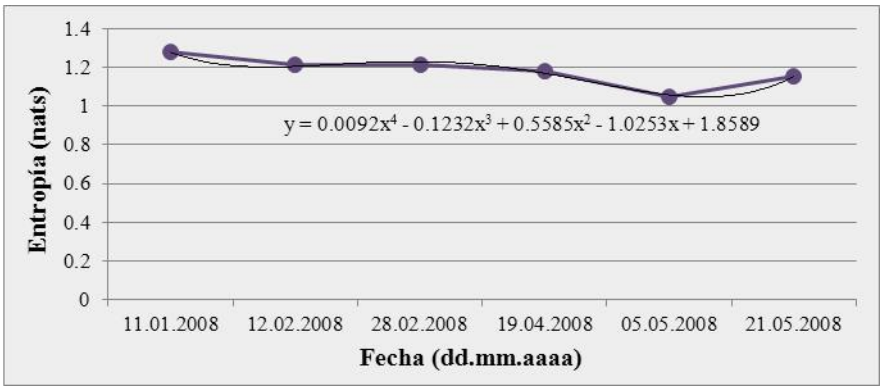

Figura 3.15 Promedio de 20 escalas de entropía calculada con el software de MSE para el campo eléctrico en HF.

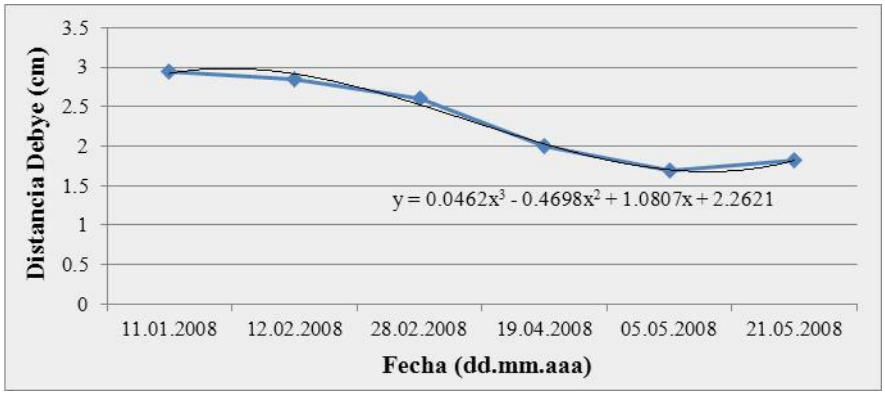

Figura 3.16 Distancia Debye calculada con los datos de satélite DEMETER.

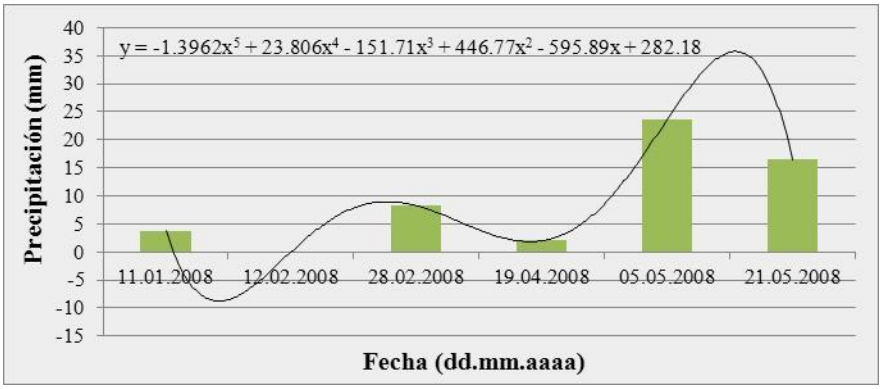

Figura 3.17 Precipitación promedio de las estaciones hidrometeorológicas administradas por el IDEA – Laboratorio de hidráulica.

Con las ecuaciones de las líneas de tendencia obtenidas se realizó una combinación lineal en la que se expresa la entropía E en función de la distancia Debye De y de la precipitación P de lluvias, así:

$$E = c_1 P + c_2 De \tag{3.1}$$

Donde $c_1 = 0.2364652$ y $c_2 = 0.275027$.

Esta relación permitirá tener un conocimiento más detallado de la variabilidad eléctrica de la ionósfera lo cual es de gran interés y abre toda una nueva línea de trabajo académico.

3.2.5.4 Conclusión del Experimento #5

Con base en las figuras antes comparadas se puede decir que existe una fuerte conexión entre la entropía de múltiples escalas del campo eléctrico medido en la ionosfera, y la distancia Debye medida en la ionosfera y Precipitación de lluvias sobre Manizales.

3.3 Correlación estadística

Por definición, la correlación estadística determina la relación o dependencia que existe entre las dos variables que intervienen en una distribución bidimensional; es decir, determina si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de la otra. En caso de que suceda, se dice que las variables están correlacionadas o que hay correlación entre ellas [48].

El coeficiente de correlación lineal se expresa mediante la letra (r) y posee las siguientes propiedades:

1. El coeficiente de correlación no varía al hacerlo la escala de medición.

2. El signo del coeficiente de correlación es el mismo que el de la covarianza.

   Si la covarianza es positiva, la correlación es directa.

   Si la covarianza es negativa, la correlación es inversa.

   Si la covarianza es nula, no existe correlación.

3. El coeficiente de correlación lineal es un número real comprendido entre menos -1 y 1, es decir $-1 \leq r \leq 1$

4. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a -1 la correlación es fuerte e inversa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime r a -1.

5. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 1 la correlación es fuerte y directa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime r a 1.

6. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 0, la correlación es débil.

7. Si $r = 1$ ó -1, los puntos de la nube están sobre la recta creciente o decreciente. Entre ambas variables hay dependencia funcional.

Habiendo observado la conexión inversa entre las variables presentadas en los experimentos, se muestran a continuación los valores del coeficiente de correlación (r) para cada uno de los experimentos.

Tabla 3.2 Coeficiente de correlación.

Número Experimento	Variable 1	Variable 2	Coeficiente de Correlación (r)
Experimento #1	Distancia Debye	Días tormentosos-mes	-0.09899974
Experimento #2		Número de medidores retirados 'sobretensión'	-0.22068933
Experimento #3		Número total de rayos	-0.13875324
Experimento #4		Precipitación	-0.09709201
Experimento #5		Entropía del Campo Eléctrico	0.8660505
	Precipitación		-0.82731699

El coeficiente de correlación calculado se utiliza para entender dos aspectos de la relación entre las variables: primero, para conocer si la relación es positiva o negativa y segundo, para conocer la fuerza de la relación.

1- El signo de cinco valores de coeficiente de correlación calculados es negativo (-), lo que corrobora la correlación inversa encontrada entre las variables presentadas en cada uno de los experimentos; el signo positivo del valor del coeficiente de correlación calculado entre la Distancia Debye y la Entropía del Campo Eléctrico indica que estas dos variables poseen una correlación directa, como se observó en las Figuras 3.15 y 3.16 en el Experimento #5.
2- El valor del coeficiente de correlación calculado en todos los experimentos es muy cercano a cero (0) lo que indica que la correlación no es lo suficientemente fuerte, lo que lleva a pensar que la correlación entre las variables no es lineal.

Por ello se propone para continuar este trabajo, hallar la correlación no lineal aprovechando la información de la base de datos del satélite DEMETER, de manera que se pueda obtener un valor de coeficiente de correlación confiable.

3.4 Conclusiones del capítulo

Según los resultados obtenidos en este estudio es evidente que existe una fuerte conexión entre la variabilidad de la ionosfera y las tormentas, es por esto que la distancia Debye se presenta como un posible parámetro para la caracterización de actividad eléctrica en la ionósfera.

Se ha mostrado que existe una relación entre los días tormentosos medidos en tierra y la distancia Debye medida en la ionosfera en el caso de Bogotá.

El comportamiento encontrado en la entropía de múltiples escalas puede estar indicando que efectivamente el satélite realizó lectura de datos en el momento en que una tormenta se estaba desarrollando, lo que afecta directamente la penetración del campo eléctrico vertical en la ionosfera acortando el radio de apantallamiento de las partículas (la distancia Debye), que finalmente indica que la distancia Debye medida en la ionosfera puede ser un potencial indicador de actividad eléctrica debida a tormentas eléctricas, lo que en el futuro daría como resultado un generador de alerta temprana de tormenta

Se debe tener en cuenta que la distancia de la esfera Debye puede estar siendo afectada no solo por la actividad eléctrica de los rayos, sino también por otras variables de tipo natural como las tormentas solares o por variables del tipo artificial provocadas por el hombre.

4 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En esta tesis se ha abordado el tema de utilizar la distancia de una esfera Debye calculada como un parámetro del plasma presente en la atmósfera terrestre para discriminar perturbaciones en la ionósfera causadas por cambios en el circuito eléctrico global, principalmente descargas eléctricas atmosféricas y precipitación de lluvias. Al respecto se puede concluir que estas perturbaciones tienen gran impacto en la conductividad de la ionósfera, lo cual se observó durante el desarrollo de los experimentos descritos en el capítulo 3.

La distancia Debye se propone como un elemento discriminante en el estudio de las descargas eléctricas y precipitación de lluvias.

Respecto a las descargas eléctricas atmosféricas:

- El número de descargas eléctricas atmosféricas posee una fuerte conexión con la distancia Debye medida en la ionósfera. El comportamiento de la distancia Debye se puede decir es inverso al número de descargas eléctricas, lo que muestra que aumenta la ionización en esta capa de la atmósfera en presencia de tormentas eléctricas.

Respecto a la precipitación de lluvias:

- La precipitación de lluvias presenta una importante conexión con el valor de distancia Debye, aunque no en todos los días de muestra estudiados, lo que sugiere que no todos los eventos de precipitación están acompañados de actividad eléctrica en la atmósfera; esto se concluye luego de explorar 50 días de muestra en un lapso de tres años.

Respecto a la quema de medidores de energía:

- La quema de medidores es un tema que requiere especial atención por parte de la empresa prestadora del servicio de energía eléctrica, especialmente en zonas como el nororiente de Caldas donde las condiciones de las carreteras y el terreno dificultan el acceso, siendo además una zona con alto nivel ceráunico. El experimento desarrollado

confirma parcialmente la información existente sobre la sobretensión como causa de fallo de los medidores: sobretensión por descargas eléctricas atmosféricas.

4.1 Hallazgos interesantes

De acuerdo con los datos obtenidos y las figuras resultantes, parece que existe una fuerte conexión inversa entre la tormenta y la variabilidad electromagnética de la ionosfera.

La entropía del campo eléctrico en HF registrado por el satélite muestra un comportamiento bastante parecido al de la distancia Debye y opuesto al promedio diario de precipitación de lluvias.

4.2 Revisión de cumplimiento de la hipótesis y los objetivos

4.2.1 En relación con la hipótesis

"La distancia Debye es un elemento discriminante en el estudio de perturbaciones en la ionósfera causadas por cambios en el circuito eléctrico global."

La Figura 4.1, muestra una propuesta para la conexión entre la tormenta eléctrica con el campo eléctrico atmosférico vertical a través de las descargas eléctricas atmosféricas, las cuales modulan su penetración en la ionósfera. De esta manera el campo eléctrico modula en amplitud el radio de la esfera Debye.

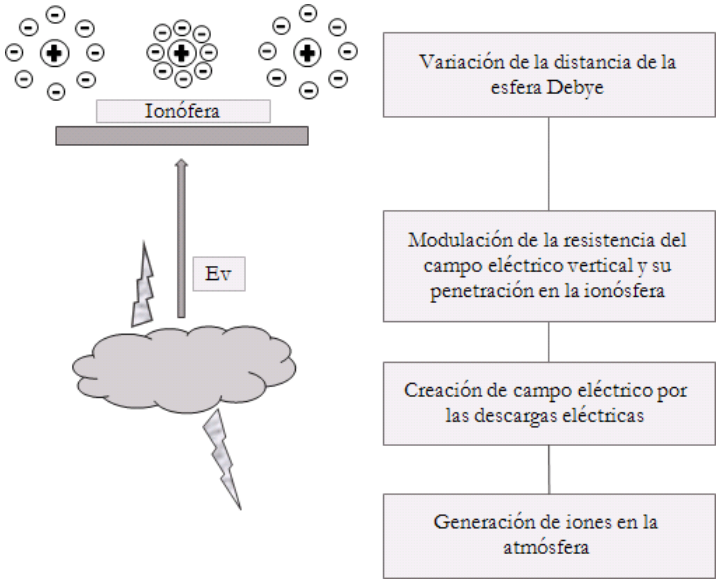

Figura 4.1 Conexión tormenta eléctrica y campo eléctrico vertical.

Los resultados de la tesis abren la puerta para el estudio de las descargas eléctricas atmosféricas desde la ionósfera, lo que abre toda una nueva línea de investigativa con la gran cantidad de proyectos que se están desarrollando alrededor de satélites de órbita baja equipados con instrumentación confiable para medir parámetros del plasma presente en la atmósfera.

4.2.2 En relación con los objetivos

a. "Estudiar el estado del arte en relación a la dinámica de la esfera Debye."

En el capítulo 2 se describió la dinámica de la esfera Debye, como se calcula y su aplicación más novedosa.

b. "Implementar el cálculo de la distancia de una esfera Debye como discriminante de actividad eléctrica en la ionósfera."

El cálculo de la distancia Debye se realizó mediante la Ecuación (2.8) implementada en una hoja de cálculo de Excel, de la cual se obtuvieron todas las figuras de distancia Debye presentadas en el capítulo 3.

c. "Evaluar el comportamiento de la ionósfera frente a las descargas eléctricas atmosféricas utilizando como herramienta la esfera Debye."

Las Figuras Figura 3.2, Figura 3.8 y Figura 3.10 presentan el comportamiento de la distancia Debye frente a las descargas eléctricas atmosféricas, donde se observa claramente que existe una fuerte conexión entre estas variables.

d. "Caracterizar los eventos de precipitación de lluvias sobre la ciudad de Manizales."

La Figura 3.11 presenta el comportamiento de la distancia Debye frente al promedio diario de precipitación de lluvias donde se observa una conexión

e. "Utilizar la base de datos de la empresa prestadora del servicio eléctrico en la zona nororiente de Caldas sobre la quema de transformadores y medidores con el fin de correlacionar la actividad ceráunica con la quema de medidores."

La Figura 3.5 presenta el comportamiento de la distancia Debye frente al número de medidores retirados cuya causa de fallo se catalogó como sobretensión, dicha figura muestra que no se puede establecer una conexión de este tipo aunque la sobretensión sea causada por una descarga eléctrica atmosférica.

4.3 Trabajo futuro

Obtener un registro constante de densidad y temperatura de electrones sobre la ciudad de Manizales mediante una estación de monitoreo, información que permita realizar un estudio más a fondo sobre los alcances de la distancia Debye relacionada con descargas eléctricas y precipitación de lluvias, y permita lanzar este parámetro de la ionósfera como un indicador de alerta temprana de tormenta.

Realizar un estudio de las descargas eléctricas atmosféricas y su relación con la precipitación de lluvias en la ciudad de Manizales y luego en Colombia.

5 REFERENCIAS

[1] J.-P. Lebreton, S. Stverak, P. Travnicek, M. Maksimovic, D. Klinge, S. Merikallio, D. Lagoutte, B. Poirier, P.-L. Blelly, Z. Kozacek, and M. Salaquarda, "The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results," *Planet. Space Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 472–486, Apr. 2006.

[2] "DEMETER home page." [Online]. Available: http://demeter.cnrs-orleans.fr/. [Accessed: 03-Jun-2014].

[3] A. C. Cortés Cortés, "ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN UNA CIUDAD DE MEDIA MONTAÑA ANDINA CASO DE ESTUDIO: MANIZALES," Universidad Nacional de Colombia, 2010.

[4] G. S. LAKHINA, "ELECTRODYNAMIC COUPLING BETWEEN DIFFERENT REGIONS OF THE ATMOSPHERE," *CURR. SCI.*, vol. 64, pp. 660–666, 1993.

[5] E. A. Bering 3rd, "The global circuit: Global thermometer, weather by product or climate modulator?," *Rev. Geophys.*, no. supplement copy Part II, pp. 845–862, 1995.

[6] Bering 3rd, E.A., A. A. Few, and J. R. Benbrook, "The global electric circuit," *Phys. Today*, no. Oct. issue, pp. 24–30, 1998.

[7] M. J. Rycroft, S. Israelsson, and C. Price, "The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 62, pp. 1563–1576, 2000.

[8] Siingh, Devendraa, R. P. Singh, A. K. Kamra, P. N. Gupta, R. Singh, V. Gopalakrishnan, and A. K. Singh, "Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 67, pp. 637–658, 2005.

[9] R. G. Roble and I. Tzur, *Study in Geophysics—The Earth's Electrical Environment*, National A. Washington, D.C., 1986, pp. 206–231.

[10] J. ODIM MENDES, A. MENDES DA COSTA, and M. OLIVEIRA DOMINGUES, "INTRODUCTION TO PLANETARY ELECTRODYNAMICS: A VIEW OF ELECTRIC FIELDS, CURRENTS AND RELATED MAGNETIC FIELDS.," *Adv. Sp. Res.*, vol. 35, pp. 812–828, 2005.

[11] M. A. UMAN and V. A. RAKOV, "A REVIEW OF THE INTERACTION OF LIGHTNING WITH AIRBORNE VEHICLES," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 39, pp. 61–81, 2003.

[12] D. R. MACGORMAN and W. D. RUST, *THE ELECTRICAL NATURE OF THUNDERSTORM*. NEW YORK: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1998, p. 422 PP.

[13] H. Torres, *El Rayo, Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia UNIBIBLOS, 2002, pp. 69–81.

[14] J. H. Estrada Estrada, "Aplicación de la entropía y esfera Debye al estudio de precursores sísmicos y calidad de la energía eléctrica," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

[15] A. N. Abarca Prouza, "Simulación fluido-cinética de los efectos ionosféricos producidos por la inyección de partículas desde el espacio," Universidad de Chile, 2011.

[16] K. Saha, *The Earth's Atmosphere Its Physics and Dynamics*. Haidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2008.

[17] J. C. Palacios, "Cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionósfera colombiana mediante la utilizacion de una red de estaciones de rastreo satelital (REICO)," Universidad Nacional de Colombia, 2010.

[18] F. J. Bueche, *Ciencias Físicas*. New York: Worth Publishers, Inc., 2004.

[19] J. V. Iribarne and H. R. Cho, *Atmospheric Physics*. Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1980.

[20] J. García Molleja, "Caracterización de austenita expandida generada por cementación iónica de aceros inoxidables. Estudio de la estabilidad frente a la irradiación con haces de iones ligeros energéticos," Universidad Nacional de Rosario, 2012.

[21] "PLASMA PHYSICS V. WALL PHENOMENA: DIFFUSION & SHEATHS." [Online]. Available:

http://www.physics.usyd.edu.au/~mmmb/plasma/Chapter5.pdf. [Accessed: 23-May-2014].

[22] G. S. Lakhina, "Electrodynamic coupling between different regions of the atmosphere," *Curr. Sci.*, vol. 64, pp. 660–666, 1993.

[23] R. G. Harrison and K. S. Carslaw, "Ion–aerosol–cloud processes in the lower atmosphere," *Rev. Geophys*, vol. 41, 2003.

[24] D. Siingh, V. Gopalakrishnan, R. P. Singh, a. K. Kamra, S. Singh, V. Pant, R. Singh, and a. K. Singh, "The atmospheric global electric circuit: An overview," *Atmos. Res.*, vol. 84, no. 2, pp. 91–110, Apr. 2007.

[25] C. G. Park and M. Dejnakarintra, "Penetration of thundercloud Electric Fields into the Ionosphere and Magnetosphere 1. Middle and Subauroral Latitudes," *J. Geophys. Res.*, vol. 78, no. 28, pp. 6623–6633, 1973.

[26] P. T. Tonev and P. I. Y. Velinov, "Atmosphere–ionosphere vertical electric coupling above thunderstorms of different intensity," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 69, no. 17–18, pp. 2510–2522, Dec. 2007.

[27] R. Markson, "Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the sun–weather relationship.," *Nature*, vol. 273, pp. 103–109, 1978.

[28] E. Soto, "Que caigan rayos," 2010. [Online]. Available: http://quecaiganrayos.blogspot.com/2010/07/el-fenomeno-del-rayo.html. [Accessed: 27-May-2014].

[29] C. M. Scavuzzo, E. E. Avila, and G. M. Caranti, "ESTUDIO NUMÉRICO DE LA ELECTRIFICACIÓN DE NUBES," *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 10, pp. 173–185, 1994.

[30] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*. 2003.

[31] M. A. Uman and E. P. Krider, "Natural and artificially initiated lightning.," *Science*, vol. 246, no. 4929, pp. 457–64, Oct. 1989.

[32] K. L. Cummins and M. J. Murphy, "An Overview of Lightning Locating Systems: History , Techniques , and Data Uses , With an In Depth Look at the U.S. NLDN," *Electromagn. Compat. IEEE Trans.*, vol. 51, no. 3, pp. 499–518, 2009.

[33] J. Lopez, E. Perez, J. Herrera, D. Aranguren, and L. Porras, "Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions," in *Lightning Protection ICLP 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1–6.

[34] J. Inampués, D. Aranguren, H. Torres, J. Montanya, I. Santoyo, and C. Younes, "ANALYSIS OF LIGHTNING FORECASTS IN COLOMBIA BASED ON THE LIGHTNING DETECTION NETWORK DATA," *X International Symposium on Lightning Protection - X SIPDA, Curitiba, Brazil. SIPDA*, no. Ic, pp. 431–436, 2009.

[35] N. C. Clements and R. E. Orville, "THE WARNING TIME FOR CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING IN ISOLATED, ORDINARY THUNDERSTORMS OVER HOUSTON, TEXAS," Texas A&M University, College Station, Texas, 2007.

[36] M. Murphy, N. Demetriades, and K. L. Cummins, "The value of cloud lightning in probabilistic thunderstorm warning," in *16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. American Meteorological Society. Orlando, FL*, 2002, pp. 134–139.

[37] M. Murphy and N. Demetriades, "The role of total lightning in thunderstorm nowcasting," *Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone, Tucson, Arizona, USA: V AlSALA Inc*, 2005.

[38] D. Aranguren, J. Montanya, G. Solá, V. March, D. Romero, and H. Torres, "On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain," *J. Electrostat.*, vol. 67, pp. 507–512, May 2009.

[39] J. Montanya, D. Aranguren, N. Pineda, G. Sola, D. Romero, and V. March, "Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning," in *Proceedings of the 20th International Lightning Detection Conference*, 2008.

[40] K. Cummins and M. Murphy, "Lightning detection methods and meteorological applications," *IV International Symposium on Military Meteorology*, 2000.

[41] Y. He, D. Yang, R. Zhu, J. Qian, and M. Parrot, "Variations of electron density and temperature in ionosphere based on the DEMETER ISL data," *Earthq. Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 349–355, Aug. 2010.

[42] T. Cussac, M.-A. Clair, P. Ultré-Guerard, F. Buisson, G. Lassalle-Balier, M. Ledu, C. Elisabelar, X. Passot, and N. Rey, "The Demeter microsatellite and ground segment," *Planet. Space Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 413–427, Apr. 2006.

[43] "CNES DEMETER." [Online]. Available: http://smsc.cnes.fr/DEMETER/GP_mission.htm. [Accessed: 03-May-2014].

[44] O. J. Soto Marín, E. A. Cano Plata, and A. J. Ustariz-Farfan, "Power Quality Causes of Failures in Colombia ´ s Rural," in *ICHQP*, 2014.

[45] F. Mejía Fernandéz and A. Pachón Gómez, "Monitoreo Climático y Prevención de Desastres en Manizales," in *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 2008, pp. 133–142.

[46] S. Valencia Ramirez, "Evaluación de la Calidad de la Potencia Eléctrica mediante la medición de Entropía del Campo Magnético radiado en inmediaciones al Transformador," 2014.

[47] M. Costa, A. L. Goldberger, and C.-K. Peng, "Multiscale Entropy Analysis (MSE)." pp. 1–8, 2005.

[48] "Correlación Estadística." [Online]. Available: http://www.ditutor.com/estadistica_2/correlacion_estadistica.html. [Accessed: 30-Sep-2014].

ANEXO A

5.1 Procedimiento general

A continuación se mostrará el procedimiento necesario para seleccionar, descargar y procesar los datos del satélite con el propósito de obtener solo los datos que tienen interés, en este caso serán aquellos que luego de ser filtrados por coordenadas se encuentren dentro de un rango de latitud y longitud que se encuentre sobre el lugar seleccionado para el estudio: Bogotá, Samaná y Manizales.

Para tener acceso a la base de datos del satélite DEMETER es necesario solicitar un nombre de usuario y contraseña directamente a los administradores de la base de datos, ellos dependiendo del tipo trabajo que se quiera realizar con los datos enviaran la autorización; en este caso Investigador Invitado. Habiendo obtenido esta autorización se accede a la página web del satélite [2] se hace selecciona 'Login' ubicado en el segundo bloque de la barra roja, como se muestra en la Figura A.1 se ingresa la información y se da click en el botón 'Validate'.

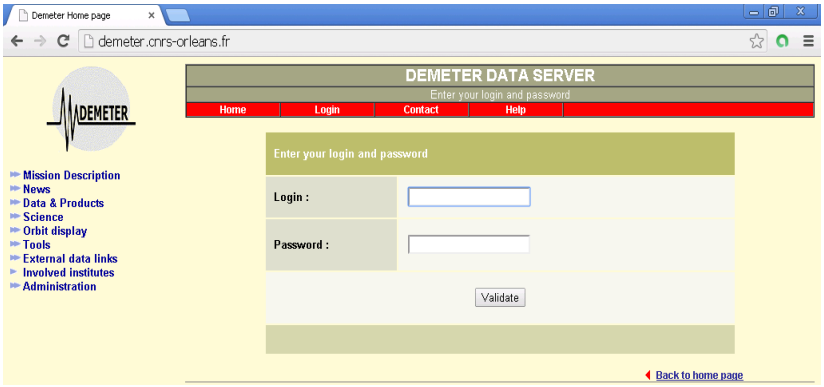

Figura A.1 Pantallazo del paso inicial para acceder a la base de datos [2]

Habiendo ingresado se procede a seleccionar y descargar la información que se desee utilizar. En la Figura A.1 una lista de opciones en letra color azul en la parte izquierda de la pantalla, para descargar la información se debe seleccionar la opción 'Data & Products', allí se despliega un menú del cual se debe seleccionar 'Level 1 Data' porque es allí donde se tendrá acceso a datos que ya han sido convertidos en magnitudes físicas. En la Figura A.2 se muestra dicha selección con las letras en color rojo. Habiendo seleccionado estas opciones se muestra en pantalla la lista de Instrumentos a los que se tienen acceso; aquí se selecciona uno o varios instrumentos según las preferencias del usuario, luego se da click en el botón que se encuentra resaltado dentro

de una circunferencia roja y finalmente en el botón 'Validate' ubicado bajo estos recuadros.

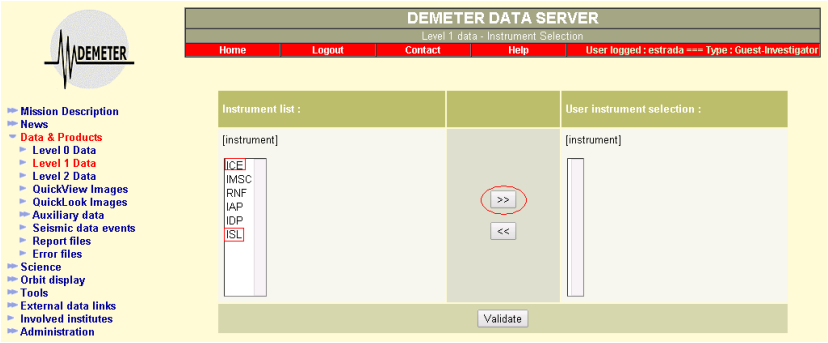

Figura A.2 Pantallazo selección de instrumento [2].

Luego en pantalla se muestra en el recuadro superior la Selección Actual donde se pueden verificar el o los instrumentos seleccionados como se muestra en la Figura A.3. En el recuadro inferior izquierdo se encuentran los tipos de datos disponibles, cada uno diferenciado por la frecuencia (dependiendo del instrumento) y por el modo de trabajo del instrumento. Se seleccionan los tipos de datos deseados, se da click en el botón que se encuentra resaltado dentro de una circunferencia roja y finalmente en el botón 'Validate' ubicado bajo estos recuadros. Para el desarrollo de los experimentos expuestos en este capítulo se seleccionó ISL/Burst, y para el último experimento se seleccionaron ICE ULF Wave burst and survey, ICE ELF Wave burst, ICE VLF Wave burst e ICE HF Wave burst.

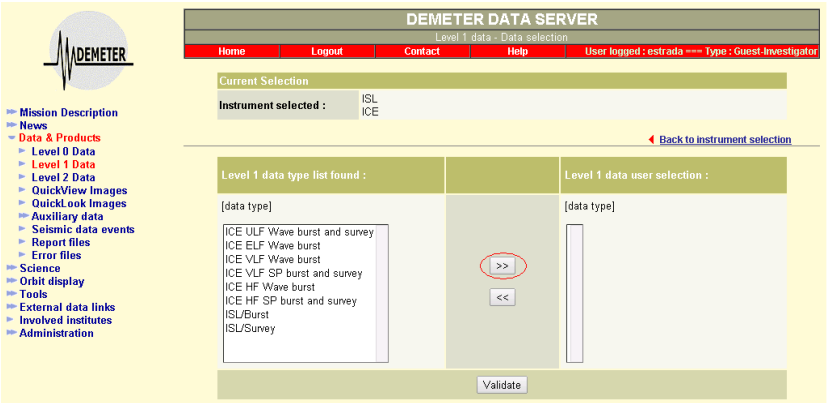

Figura A.3 Pantallazo selección del tipo de datos [2].

En la Figura A.4 aparecen las opciones ofrecidas para seleccionar la información que sea de utilidad, se puede escoger entre tres opciones: la opción 'All' en cuyo caso se estarían seleccionando toda la información que ofrece la base de datos (desde la primera órbita hasta la última en todo el tiempo de operación del satélite), la opción

'From Time' en cuyo caso se puede escoger un lapso de tiempo que sea de interés para el estudio o la opción 'From half orbit number' en cuyo caso el usuario conoce el número o los número de órbitas que desea estudiar. En la parte baja se encuentran tres botones dos de los cuales sirven para acotar la búsqueda de información: seleccionando 'Validate' se pasará directo sin acotar la búsqueda, seleccionando 'Reduce with geographic zones' se podrá acotar la búsqueda ayudados por las coordenadas del lugar a estudiar y seleccionando 'Reduce with earthquakes' se podrá acotar la búsqueda ayudados por información de sismos. Para el desarrollo de los experimentos expuestos en este capítulo se seleccionó la opción 'From Time' para descargar mes a mes la información del instrumento ISL y se acotó la búsqueda mediante zonas geográficas.

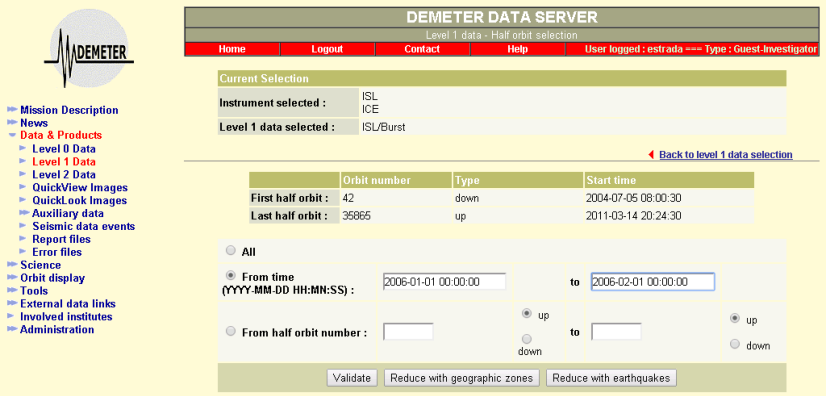

Figura A.4 Pantallazo selección de información [2].

En la Figura A.5 se muestran los espacios donde se ingresarán las coordenadas, como se puede observar hay una instrucción: (Resolución: 10 grados para Latitud y 20 grados para Longitud) por lo que se debe seleccionar un rango de coordenadas que contenga las coordenadas del lugar de estudio y luego se da click en el botón 'Validate'. En el caso de los experimentos expuestos en este capítulo se seleccionó así: 0 – 10 grados para Latitud y 280 – 300 grados para Longitud.

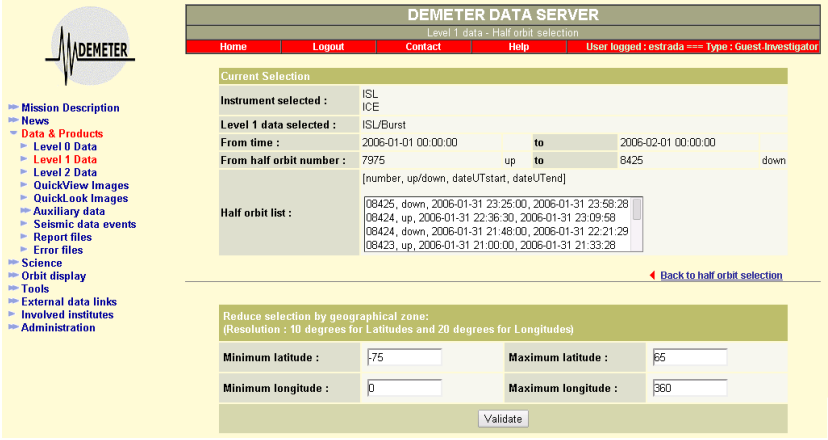

Figura A.5 Pantallazo reducción por zona geográfica [2].

En la Figura A.6 se pueden observar dos grandes recuadros: en el recuadro superior se muestra la Selección Actual con todas las opciones que han sido seleccionadas anteriormente, en el recuadro inferior se muestra la lista de las medias órbitas que cumplieron con los criterios de selección, de esta lista se pueden seleccionar grupos de máximo 10 elementos, se da click en el botón que se encuentra resaltado dentro de una circunferencia roja y finalmente en el botón 'Validate' ubicado en la parte inferior.

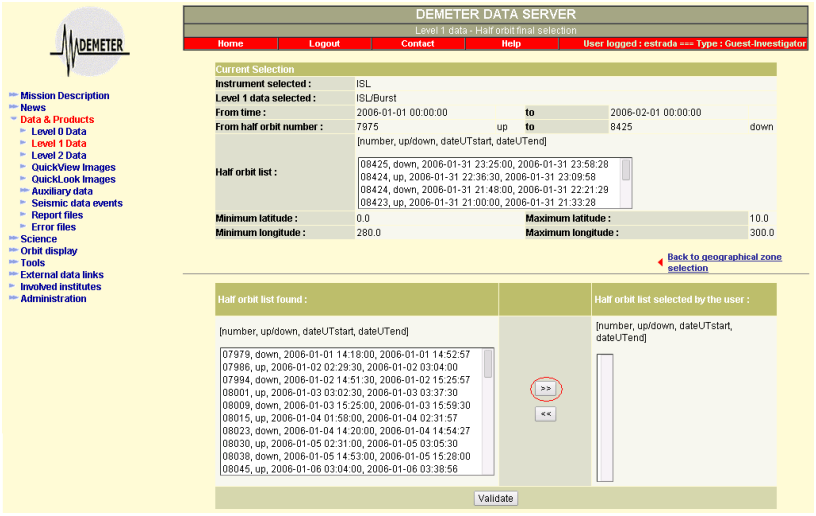

Figura A.6 Pantallazo selección de medias orbitas para descarga [2].

En la Figura A.7 se muestra la información del paquete de datos a descargar, aquí se muestra el instrumento, las fechas de inicio y final, el tiempo de duración y aparecen las opciones de descarga del archivo: normal o comprimido. Se selecciona el paquete dando click en el cuadro ubicado bajo el título 'Select' y se da click en la opción de descarga.

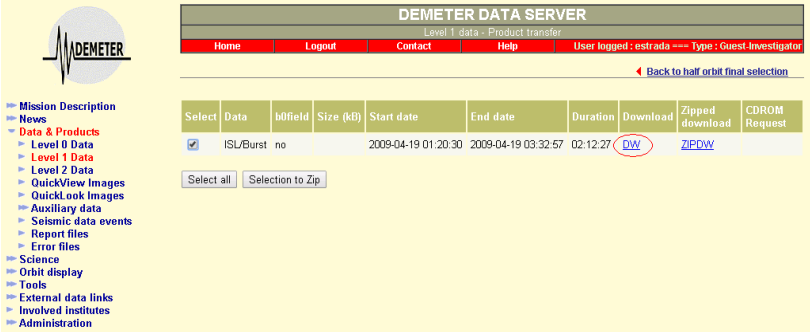

Figura A.7 Pantallazo selección del paquete a descargar [2]

Habiendo seleccionado la opción de descarga y luego de esperar unos segundos aparece el archivo a descargar como se muestra en la Figura A.8, donde se debe dar click derecho sobre la línea en color azul que dice 'The file is ready for transfer. Click here to get the file' y se abre la ventana de diálogo donde se selecciona la carpeta donde se desea guardar el archivo.

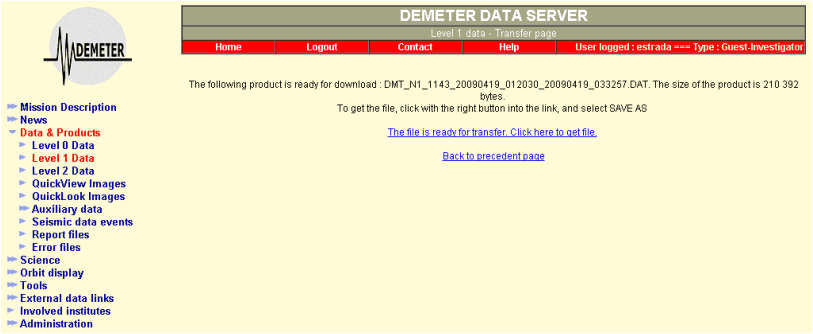

Figura A.8 Pantallazo descarga del archivo [2].

El paquete descargado no puede ser leído sino hasta ser abierto en un software que proveen los administradores del satélite DEMETER Figura A.9. Luego estos paquetes pueden ser procesados en Microsoft Excel donde aprovechando sus diferentes opciones se realiza el segundo filtro de coordenadas, un filtro fino con 1 grado para latitud y 1 grado para longitud a partir de las coordenadas para cada una de las ciudades a estudiar: Bogotá, Samaná y Manizales.

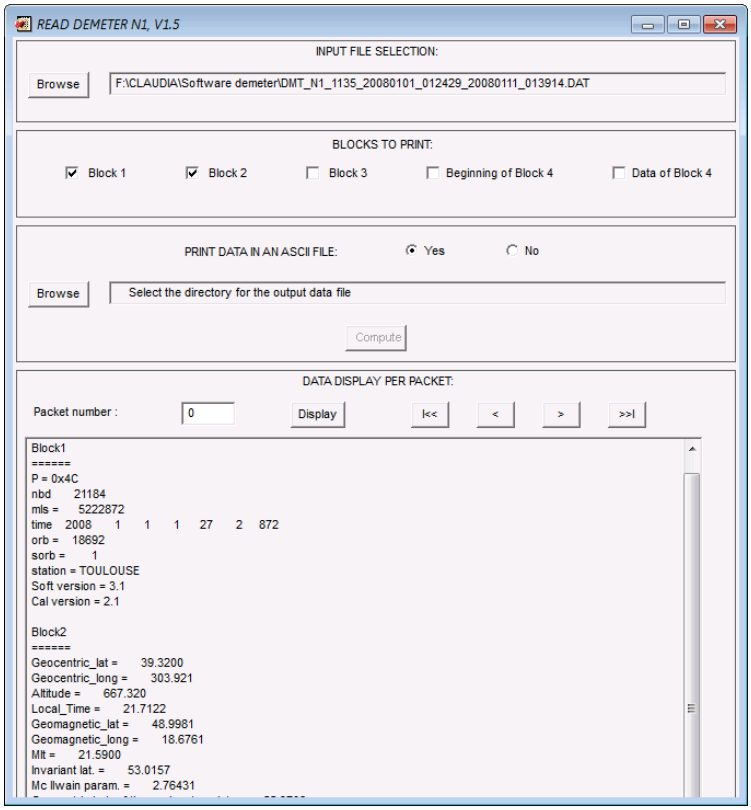

Figura A.9 Ventana software para lectura de datos DMT_N1 satélite DEMETER.

De esta manera se obtienen los días de muestra para calcular la distancia Debye, los cuales tienen una frecuencia de entre 13 y 16 días lo que da dos muestras por mes aproximadamente, y en algunos meses ninguna muestra debido al filtro fino de coordenadas. Es aquí donde teniendo las fechas en las que el satélite pasó sobre el área de estudio, se toman las mismas fechas de muestra en la información a asociar: días de tormenta, número de medidores dañados, densidad de descargas a tierra, precipitación de lluvias, y se compara su comportamiento con el de la distancia Debye calculada.