



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**INSTITUTO DE GEOFISICA**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

---

**EFFECTOS DE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS EN LOS  
RAYOS CÓSMICOS DETECTADOS EN LA SUPERFICIE  
TERRESTRE**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ORIENTACIÓN EN FÍSICA ESPACIAL  
P R E S E N T A:**  
**J E S U S A L V A R E Z C A S T I L L O**

**ASESOR: DR. JOSÉ FRANCISCO VALDÉS GALICIA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.**

**2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**“A Dios por la fortaleza, templanza, mansedumbre, inteligencia, y conocimiento que ha puesto en mí, porque suyos son el poder y la sabiduría. Sin esto no hubiese sido posible realizar este trabajo, esto es producto tuyo Señor. ¡Gracias Padre!”**

**“A mis Padres que en paz descansen:  
Lucia Castillo Flores y Claudio Alvarez  
Hernández”**

**“A mi Tía: Ma. Concepción Castillo Flores  
por su amor, educación y apoyo incondicional”**

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento con especial aprecio a mi asesor de tesis, Dr. José Francisco Valdés Galicia, quién ha contribuido a mi crecimiento profesional y personal, por sus asesorías, por sus consejos, así como por el apoyo que me ha brindado durante mis estudios de maestría.

A los miembros del jurado, por aceptar el compromiso de revisar este trabajo, así como por sus acertados comentarios y sobre todo por su valioso tiempo dedicado, a la Dra. Graciela Binimelis de Raga, Dr. Rogelio Caballero López, Dr. Gustavo Medina Tanco y Dr. Agustín Muhlia Velásquez, a todos ellos ¡muchas gracias!

Todo trabajo acabado es producto de muchas personas, a mis catedráticos, al personal administrativo, al personal de confianza, y a todos aquellos que contribuyeron de forma directa o indirecta, un agradecimiento especial.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de formar parte de su historia.

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

## **CAPITULO I**

<b>LOS RAYOS CÓSMICOS .....</b>	<b>4</b>
---------------------------------	----------

1.1 ANTECEDENTES .....	5
1.2 LA RADIACIÓN CÓSMICA EN LA ATMÓSFERA .....	6
1.2.1 <i>La Radiación Cósmica Primaria</i> .....	6
1.2.2 <i>La Radiación Cósmica Secundaria</i> .....	7
1.3 ESPECTRO DE ENERGÍA.....	10
1.4 EFECTOS DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO .....	12
1.4.1 <i>Teoría de Störmer</i> .....	14
1.4.2 <i>Efecto Latitudinal</i> .....	15
1.4.3 <i>Rigidez Umbral</i> .....	15
1.5 EFECTOS ATMOSFÉRICOS .....	16
1.5.1 <i>Efecto Altitudinal</i> .....	16
1.5.2 <i>Efecto debido a la Humedad y a la Acumulación de Agua</i> .....	17
1.5.3 <i>Efecto debido a la Gravedad</i> .....	17
1.5.4 <i>Efecto debido a cambios en la Presión</i> .....	17
1.5.5 <i>Efecto debido a cambios en la Temperatura</i> .....	18
1.5.6 <i>La influencia del Viento</i> .....	18
1.6 VARIACIONES EN LA INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN CÓSMICA .....	19
1.6.1 <i>Variaciones debidas al Campo Geomagnético</i> .....	21
1.6.1.1 Variaciones debidas a tormentas magnéticas.....	21
1.6.2 <i>Variaciones debidas a la Atmósfera</i> .....	22
1.6.2.1 Variaciones en la Intensidad de la Componente Muónica .....	23
1.6.2.2 Variaciones en la Intensidad de la Componente Electromagnética .....	23
1.6.3 <i>Variaciones debidas al Sol</i> .....	23
1.6.3.1 Origen de la Modulación Solar de los Rayos Cósmicos .....	24
1.6.3.2 Variación Diurna .....	25
1.6.3.3 Variación de 11 y 22 Años .....	26
1.6.3.4 Decremento Forbush .....	27

## **CAPITULO II**

<b>EL TELESCOPIO DE MUONES.....</b>	<b>30</b>
-------------------------------------	-----------

2.1 BREVE HISTORIA DE LOS DETECTORES DE RADIACIÓN CÓSMICA .....	31
2.2 DESCRIPCIÓN DEL TELESCOPIO DE MUONES.....	32
2.3 PRINCIPIO GENERAL DE DETECCIÓN.....	33
2.3.1 <i>Los Plásticos Centelladores</i> .....	35
2.3.1.1 Características Físicas .....	35
2.3.1.2 Sistema de Guía de Luz.....	36
2.3.2 <i>Los Tubos Fotomultiplicadores</i> .....	37
2.4 GEOMETRÍA DEL SISTEMA .....	37
2.5 CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS .....	39
2.6 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.....	42
2.7 ELECTRÓNICA ASOCIADA .....	42
2.7.1 <i>Requerimientos Generales</i> .....	43
2.7.2 <i>Circuitos Electrónicos</i> .....	44

## CAPITULO III

### LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS..... 46

3.1 EL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL.....	47
3.2 GENERALIDADES SOBRE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS .....	48
3.3 EVOLUCIÓN DE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS .....	49
3.3.1 Fase de Formación .....	49
3.3.2 Fase de Madurez.....	50
3.3.3 Fase de Disipación .....	50
3.4 ESTRUCTURA ELÉCTRICA DE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS .....	50
3.4.1 Distribución de Carga .....	51
3.4.2 Mecanismo de Generación de Cargas .....	51
3.4.3 El Origen de la Carga Positiva en la Parte Inferior de la Nube .....	53
3.5 DESCARGA ELÉCTRICA .....	54
3.5.1 Tipos de Descarga .....	54
3.5.2 Mecanismo de Generación.....	55
3.6 EL TRUENO.....	56
3.6.1 Mecanismo de Generación.....	56
3.6.1.1 Generación de Truenos Audibles.....	56
3.6.2 Propagación.....	57

## CAPITULO IV

### ANTECEDENTES ..... 58

4.1 INTRODUCCIÓN.....	59
4.2 Estudios Realizados con la Componente Electromagnética .....	60
4.3 Estudios Realizados con la Componente Nucleónica .....	66
4.4 Estudios Realizados con la Componente Muónica .....	67

## CAPITULO V

### ESTUDIOS DE CASOS..... 69

5.1 INTRODUCCIÓN.....	70
5.2 OBTENCIÓN DE LOS DATOS.....	70
5.3 CORRECCIÓN Y SELECCIÓN DE LOS DATOS.....	71
5.3.1 Eliminación de Variaciones Geomagnéticas .....	71
5.3.2 Eliminación de Variaciones en el Espectro Primario.....	71
5.3.3 Correcciones por Efectos Atmosféricos .....	71
5.3.4 Elección de las Tormentas Eléctricas .....	75
5.4 METODOLOGÍA UTILIZADA.....	75
5.4.1 Filtrado .....	76
5.4.1.1 Identificación de la Tormenta Eléctrica .....	77
5.4.2 Prueba Kolmogorov-Smirnov .....	77
5.4.2.1 Generalidades del Método .....	77
5.4.3 Análisis de Tiempo-Frecuencia .....	78
5.4.3.1 Generalidades del Método de Ondeletas .....	78
5.4.3.2 Alrededores de la Tormenta .....	79
5.4.3.3 Días Quietos .....	80
5.4.3.4 Durante la Tormenta Eléctrica.....	81
5.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
5.5.1 Filtrado .....	82

5.5.2 Prueba Estadística.....	83
5.5.3 análisis tiempo-frecuencia.....	84
5.6 FUENTES DE INCERTIDUMBRE.....	86

## **CONCLUSIONES..... 87**

5.1 FILTRADO.....	88
5.2 PRUEBA ESTADÍSTICA.....	88
5.3 ANÁLISIS DE ONDELETAS.....	88
5.4 TRABAJOS FUTUROS.....	89

## **APÉNDICE..... 90**

APÉNDICE 1: LISTA DE DÍAS DE TORMENTA Y DÍAS QUIETOS.....	91
APÉNDICE 2: FILTRADO.....	94
APÉNDICE 3: PRUEBA ESTADÍSTICA KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA DOS MUESTRAS.....	96
A3.1 Método.....	96
APÉNDICE 4: EL ANÁLISIS DE ONDELETAS (WAVELET).....	97
A4.1 Los Datos.....	97
A4.2 La Transformada de Fourier por Ventana.....	97
A4.3 La transformada Ondeleta.....	98
A4.3.1 Función Ondeleta.....	98
A4.3.2 Normalización.....	99
A4.3.3 Espectro de Potencia Ondeleta.....	100
A4.3.4 Cono de influencia.....	100
A4.4 Espectro Teórico y Niveles de Significancia.....	100
A4.4.1 Espectro de fourier de ruido rojo.....	101
A4.4.2 Niveles de Significancia.....	101
A4.4.3 Espectro Global Ondeleta.....	101
A.4.5 Gráfico.....	102

## **BIBLIOGRAFÍA..... 103**

LIBROS Y PUBLICACIONES:.....	104
INTERNET:.....	109

# INTRODUCCIÓN



El estudio de la radiación cósmica, es un mundo fascinante. Debido a que estos proporcionan información de lo que está pasando en el universo, tales como la síntesis nuclear de las estrellas, las características de la galaxia y el sistema solar.

El viaje de estos mensajeros, que transportan tan valiosa información no es nada fácil, debido a que son partículas cargadas que han sido despojadas de sus electrones, y en su camino hacia la órbita terrestre cruzan campos magnéticos de diferente magnitud, por lo que, muchas de estas partículas serán desviadas de sus trayectorias originales y otras arrastradas por el viento solar, y otros fenómenos astrofísicos como fulguraciones o eyecciones de masa coronal (explosiones solares), de tal manera que perderán parte de su energía, y al llegar a la órbita terrestre las partículas de menor energía serán atrapadas por las líneas más externas de la magnetosfera terrestre, entrando de esta manera por los polos. Mientras que las partículas con mayor energía llegarán a latitudes más bajas.

Sin embargo estos, núcleos de átomos que viajan a través de la galaxia y el medio interplanetario es lo que se conoce como rayos cósmicos primarios, y si creía que la travesía de estos mensajeros había terminado, la respuesta es no, debido a que les falta vencer un último reto, la atmósfera terrestre.

Al llegar a la atmósfera terrestre los rayos cósmicos primarios, interactúan con los átomos atmosféricos, ya sea, ionizando parte de esta o colisionando y destruyendo núcleos atmosféricos. Por el proceso de colisión se obtendrán nuevas partículas, que recibirán el nombre de rayos cósmicos secundarios, que estarán formados por tres componentes: componente nucleónica, electromagnética y muónica. Y estas componentes se verán afectadas a su vez, por las condiciones atmosféricas (densidad de partículas, presión, temperatura, etc.).

De esta manera, se ha observado a lo largo de muchas investigaciones realizadas en el campo de los rayos cósmicos, que las fluctuaciones en la atmósfera y en el campo magnético interplanetario y terrestre, provocan variaciones en el conteo de la intensidad de la radiación cósmica detectada en la superficie terrestre.

De lo mencionado anteriormente, se puede concluir que las variaciones en la intensidad de los rayos cósmicos se deben a tres factores: a cambios en el espectro de los rayos cósmicos primarios, a efectos geomagnéticos y efectos atmosféricos.

El interés de este trabajo se enfoca, hacia el estudio de las variaciones en la intensidad de la componente electromagnética y muónica de los rayos cósmicos secundarios, que es debida a intensos campos eléctricos atmosféricos presentes en las nubes de tormenta eléctrica.

Dado que vamos a relacionar dos fenómenos diferentes, se inicia el capítulo I, con un estudio general de los rayos cósmicos, donde se detalla sus aspectos físicos, así como la interacción de estos, con fenómenos astrofísicos, con el campo geomagnético y la atmósfera terrestre; para de esta manera entender, las variaciones existentes en la intensidad de los rayos cósmicos.

Dado que una manera de identificar las variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos, es mediante el análisis de las mediciones hechas en superficie por los respectivos detectores, en el capítulo II, se aborda el telescopio de muones, con la finalidad de que se entienda, como se realiza la detección de la componente muónica y electromagnética de la radiación cósmica, además de que se conozca las geometría y limitantes del instrumento.

Ahora bien, dado que ya se conoce todo lo referente a los rayos cósmicos, el objetivo del capítulo III, es dar a conocer los aspectos principales de las tormentas eléctricas, tales como: la formación de las nubes de tormenta, así como los mecanismos de generación y separación de cargas eléctricas, lo cual proporciona información importante del campo eléctrico presente en la nube, el cuál es el protagonista principal del presente trabajo, donde se estudian las anomalías que estos provocan en la intensidad de los rayos cósmicos.

Por otra parte, en el capítulo IV, se da la conexión entre las tormentas eléctricas y la intensidad de los rayos cósmicos, por lo que, se presenta una revisión de las investigaciones realizadas en los últimos 25 años, referentes a variaciones presentadas en la intensidad de los rayos cósmicos, que son producto de las tormentas eléctricas.

Ya conocido el fenómeno de las tormentas eléctricas, la física de los rayos cósmicos y la conexión entre ambos fenómenos, se procedió a realizar el trabajo de investigación empleando datos del telescopio de muones de Ciudad Universitaria y datos meteorológicos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Estos detalles se presentan en el capítulo V, donde se expone la metodología utilizada, su respectiva justificación, el tratamiento que se les dio a los datos y la discusión de los resultados.

Las conclusiones de los análisis realizados y posibles trabajos futuros, son presentados en el capítulo VI.

Finalmente se realizó un apéndice, en donde se pretende explicar con mayor detalle la metodología que se empleó.

# **CAPITULO I**

---

---

## **LOS RAYOS CÓSMICOS**

## 1.1 Antecedentes

Desde tiempos remotos ha llegado a la Tierra una lluvia de partículas que provienen de todas direcciones. A esta lluvia se le conoce con el nombre de Rayos Cósmicos, los cuáles son partículas cargadas que consisten de núcleos de átomos ordinarios que fueron despojados de sus electrones; debido a los procesos de aceleración de las partículas que arrancan los electrones de los átomos, dejando solo núcleos y electrones aislados. Estas partículas se producen por fuentes estelares como el Sol, las supernovas y sus remanentes, las estrellas de neutrones, los hoyos negros, los núcleos activos de galaxias y algunas otras fuentes hasta hoy desconocidas.

Estas partículas fueron descubiertas cuando se comprobó que la conductividad eléctrica de la atmósfera terrestre se debía a la ionización causada por radiaciones de alta energía; la cual detectaron a finales del siglo XIX mediante el uso de electroscopios. En esa época se creía que la radiación provenía de la Tierra, y que conforme se alejara uno de la superficie la radiación debería disminuir, esta idea se mantuvo hasta que se iniciaron los experimentos con electroscopios a diferentes alturas. Los resultados obtenidos no coincidían del todo con la idea que se tenía, puesto que la radiación disminuía lentamente con la altura y posteriormente se empezaba a incrementar, fue entonces, cuando el físico estadounidense de origen austriaco Víctor F. Hess en 1912, realizó una serie de experimentos en globo aerostático a mayores alturas, llevando consigo electroscopios herméticamente cerrados para que se mantuvieran a presión constante y no variase la sensibilidad del instrumento, de esta manera demostró que la ionización atmosférica aumenta con la altitud, y concluyó que la radiación debía proceder del espacio exterior. En 1926 R. A. Millikan tras convencerse de los resultados de Hess, bautiza la radiación de origen extraterrestre con el nombre de "Rayos Cósmicos".

Con el tiempo los científicos se dieron cuenta que la radiación cósmica llega a la Tierra uniformemente desde todas direcciones y que su poder de penetración es mucho mayor que el de cualquier otra radiación conocida. Por lo que en un principio se creía que los rayos cósmicos eran rayos gamma ( $\gamma$ ) de muy alta energía, así como rayos beta ( $\beta$ ) provenientes de materiales radiactivos.

Sin embargo experimentos posteriores realizados por Bothe y Kolhörster, en donde colocaron dos contadores Geiger-Müller<sup>1</sup>, uno arriba del otro, dentro de una caseta rodeada por todos lados de 0.05 m de Hierro y 0.06 m de plomo, donde el resultado obtenido fue que el número de descargas simultáneas de los dos contadores excedía por mucho el número de descargas que se esperarían accidentalmente; para reducir el número de coincidencias a un 24 % se tuvo que remover el blindaje de la parte superior de la caseta y colocarse una placa de oro de 0.041 m. Lo cual quería decir que aproximadamente el 76% de la radiación cósmica cerca del nivel del mar podía penetrar 0.041 m de oro; y también, que solo una fracción de los electrones producidos por efectos Compton<sup>2</sup> en un punto dado

---

<sup>1</sup> Detectores de partículas ionizantes, los cuales contienen un gas de rápida respuesta.

<sup>2</sup> El efecto Compton consiste en la colisión de un fotón y un electrón. Al chocar el fotón con el electrón cede a éste parte de su energía y sale desviado en otra dirección, pero con menor energía de la que traía originalmente. Cuando la interacción es con un electrón de un átomo, éste puede ser liberado.

de la atmósfera tendría un alcance tan grande. La principal conclusión fue: “haber detectado una radiación corpuscular por la cual podían ser explicados los hasta entonces efectos de la radiación de muy alta energía. Es poco probable que exista una radiación gamma de poder de penetración comparable y no existe hasta ahora alguna razón para dicha suposición”.

La prueba final de que los rayos cósmicos eran partículas cargadas provino del experimento iniciado en 1930 por A. H. Compton, quién llevó a cabo una serie de mediciones de la intensidad de los rayos cósmicos en 69 estaciones alrededor del mundo. Estas observaciones confirmaron la existencia de un efecto latitudinal en la intensidad de la radiación cósmica, como lo había reportado J. Clay en 1927, donde los resultados de Compton estaban mejor correlacionados con la latitud magnética que con la geográfica.

La verdadera naturaleza de la radiación incidente en la Tierra no fue realmente determinada sino hasta mediados del siglo pasado. En los treinta ya se sospechaba que los principales constituyentes de la radiación cósmica eran los protones, pero no fue hasta que se realizaron ciertos experimentos con emulsiones fotográficas, a grandes alturas en globos aerostáticos, cuando se determinó que la radiación cósmica primaria consistía de protones, partículas alfa ( $\alpha$ ) y núcleos más pesados.

## **1.2 La Radiación Cósmica en la Atmósfera**

El nombre de radiación cósmica se le ha dado a la totalidad de las diferentes partículas primarias que llegan al tope de la atmósfera (radiación cósmica primaria), así como al conjunto de partículas secundarias producidas en la atmósfera por interacciones nucleares entre las primarias y núcleos atmosféricos (radiación cósmica secundaria).

El descubrimiento de la radiación primaria y secundaria se debió a la realización de varios experimentos empleando telescopios contadores, los cuales son dos o más contadores Geiger-Müller operando en coincidencia.

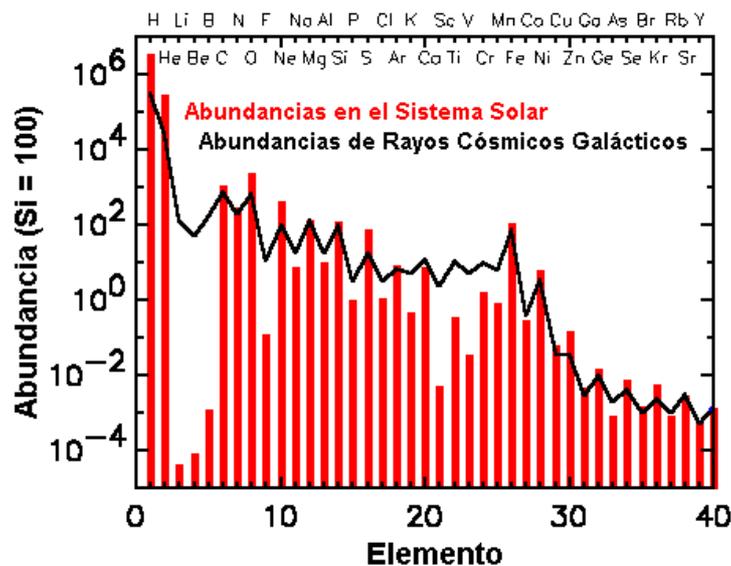
Con estos se detectaron chubascos de rayos cósmicos, el procedimiento fue separar los contadores de tal manera que una partícula proveniente de arriba no pudiera descargar a ambos, sin embargo de vez en cuando se descargaban simultáneamente. La conclusión fue obvia, las partículas que se observaban en la superficie no siempre llegaban solas, sino que a veces lo hacían como miembros de cierto grupo que viajaban más o menos verticalmente. Donde a esos grupos de partículas, que descendían juntas casi al mismo tiempo, se les denominó chubascos de rayos cósmicos.

### **1.2.1 La Radiación Cósmica Primaria**

La radiación cósmica primaria esta compuesta en un 93% por protones (núcleos de hidrógeno), un 6.3% son partículas alfa (núcleos de helio). Y el 0.7% restante son núcleos de elementos más pesados; los cuales se dividen en: elementos ligeros (litio, berilio y boro),

medianos (carbono, nitrógeno, oxígeno y flúor) y elementos pesados (todos los elementos restantes).

Conocer la composición de la radiación cósmica primaria es muy relevante, porque los rayos cósmicos son una muestra directa de materia proveniente de las afueras del sistema solar, lo cual proporciona información importante sobre la evolución química del universo. La abundancia de cada uno de los elementos, tanto del sistema solar como de los rayos cósmicos galácticos se muestra en la figura 1.1.



**Figura 1.1:** Comparación de las abundancias de los distintos elementos en el Sistema Solar y en los Rayos Cósmicos. (Tomada de la NASA [1])

En la figura 1.1 el silicio (Si) es usado como punto de normalización; se puede apreciar que la radiación cósmica galáctica de protones y partículas alfa es proporcionalmente menor que la que hay en el sistema solar, lo cual se piensa que es debido a que estos dos tipos de partículas son difíciles de acelerar a altas energías a diferencia de los elementos más pesados. La sobreabundancia de elementos ligeros en los rayos cósmicos se debe a la fragmentación de elementos más pesados al atravesar aproximadamente de 30 a 40 kilogramos por metro cuadrado de materia interestelar. Además de los núcleos de elementos normales, se encuentran en los Rayos Cósmicos algunas partículas de antimateria, como los antiprotones con energías cercanas a 1 GeV.

### 1.2.2 La Radiación Cósmica Secundaria

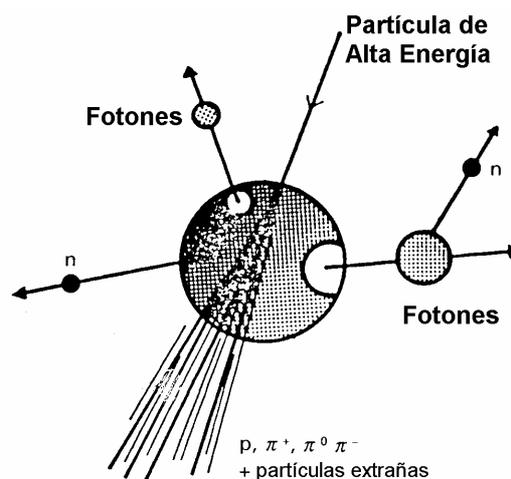
La radiación cósmica secundaria se produce cuando la radiación cósmica primaria penetra la atmósfera, y resulta en colisiones de un protón (por ser más abundantes) con las

moléculas del aire. Las colisiones pueden ser de dos tipos: con la estructura electrónica del átomo, o con el mismo núcleo.

Las colisiones del primer tipo son más frecuentes, generalmente dan lugar a que un electrón sea liberado de la estructura del átomo; este mecanismo es conocido como ionización. Las colisiones individuales tienen solo un ligero efecto en partículas como los rayos cósmicos primarios al moverse a través de la atmósfera: las deflexiones en sus trayectorias son prácticamente despreciables, y la pérdida de 30 eV, de los varios millones que traen, son microscópicas. De esta manera si un protón penetrase verticalmente toda la atmósfera teniendo este tipo de interacción, perdería solo 2 GeV de energía ionizando el aire. Por lo que un rayo cósmico primario con energía cinética menor no produciría efecto alguno observable a nivel del mar.

Las colisiones del segundo tipo, se dan cuando un rayo cósmico primario choca directamente con el núcleo de un átomo atmosférico (por ejemplo: oxígeno o nitrógeno) y lo desintegra. En este tipo de colisiones es donde el número de partículas secundarias se incrementa. Una colisión nuclear ocurrirá en promedio después de que la partícula incidente atravesase alrededor de  $80 \text{ g/cm}^2$  de aire o  $62 \text{ g/cm}^2$  de agua.

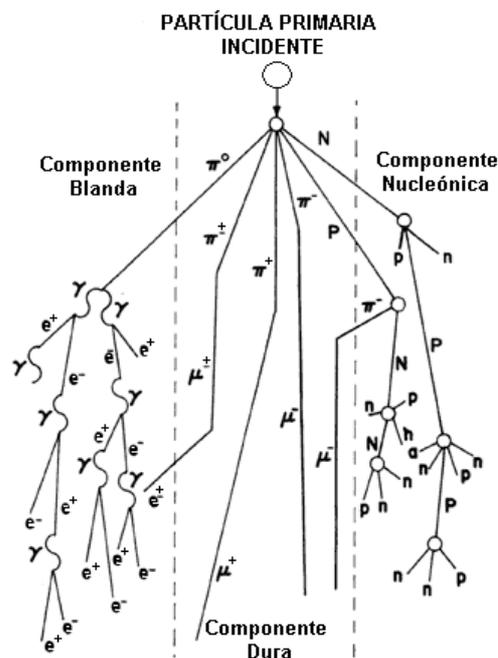
En el caso de colisiones de rayos cósmicos primarios de alta energía con átomos atmosféricos se generan como principal producto piones neutros y cargados, además pueden producirse también algunas partículas extrañas y en ocasiones algunos antinucleones. Todos estos productos se alejan de la interacción con muy alta energía, conservando la dirección de la partícula incidente. Cada partícula secundaria es capaz de colisionar dentro del mismo núcleo y formar una minicascada dentro del mismo. En las interacciones con partículas de alta energía solamente uno o dos nucleones participan, los cuales generalmente son removidos del núcleo saliendo de este en un estado altamente excitado, lo cual no garantiza que el núcleo resultante sea una especie estable, y termine desintegrándose por espalación<sup>3</sup> (ver figura 1.2).



**Figura 1.2:** Colisión de una partícula de alta energía.

<sup>3</sup> La espalación consiste en la evaporación de diferentes fragmentos nucleares del núcleo de un átomo.

Existen tres componentes a través de las cuales la partícula primaria cede su energía a la atmósfera hasta el nivel del mar o aún más abajo: 1) la componente nucleónica; 2) la componente muónica; y 3) la componente electromagnética. Dependiendo de la energía que trae la partícula primaria, predomina uno de estos tres mecanismos de conversión de la energía primaria en una componente secundaria. Estas componentes se pueden apreciar en la figura 1.3.



**Figura 1.3:** Producción de partículas secundarias en la atmósfera. (Tomada de [51])

Los neutrones y los protones, son producto de la desintegración de un átomo atmosférico por una partícula primaria de baja energía, estos dan lugar a la componente nucleónica. Sin embargo, estos nucleones, de energía menor que la de la partícula primaria, tienen suficiente energía como para actuar como si fuesen partículas primarias e interactuar con nuevos átomos atmosféricos.

En el caso de partículas primarias de mayores energías, las interacciones nucleares no son elásticas, esto significa que la energía total que traía la partícula primaria no es igual a la de los nucleones producidos en la desintegración nuclear, ya que parte de esa energía se ha ido en la creación de un nuevo tipo de partículas y en proveerles la energía cinética con la cual se alejan del punto donde ocurrió la interacción; estas interacciones constituyen la componente dura. Son estas nuevas partículas, los piones ( $\pi$ ), los kaones ( $\kappa$ ) y otras partículas extrañas; donde la parte principal la constituyen los piones, los cuales al igual

que todas aquellas partículas que son creadas en interacciones nucleares son inestables: de ahí que tengan que decaer, en algún tipo de partícula estable. Los piones, en particular, existen en tres diferentes estados de carga, pueden tener carga eléctrica positiva, negativa o ser neutros. Mientras que los cargados decaen en muones ( $\mu$ ) de la misma carga, los neutros decaen en dos rayos gama ( $\gamma$ ), los cuales mediante una sucesión de procesos electromagnéticos dan lugar a un gran número de partículas que se extienden sobre grandes áreas. Los muones producto del decaimiento de los piones cargados, son también inestables, debido a que estos no tienen prácticamente interacción nuclear, solo disminuyen su energía ionizando, por lo que muones de baja energía tienden a decaer en positrones ( $e^+$ ), electrones ( $e^-$ ) y muón neutrinos ( $\nu_\mu$ ), mientras los que son producto de partículas de muy alta energía, su pérdida por ionización es pequeña y pueden llegar hasta la superficie de la Tierra.

Por último la componente blanda o electromagnética está formada principalmente por electrones y positrones resultantes del decaimiento de los muones (negativos y positivos), procesos de ionización, producción de pares y de las cascadas fotón-electrón.

Las cascadas fotón-electrón se da de la siguiente manera: un fotón de alta energía genera un par positrón-electrón, cada uno de los cuales posteriormente genera fotones por bremsstrahlung<sup>4</sup>, y estos a su vez generan un par positrón-electrón, y nuevamente estos generan fotones y así sucesivamente, hasta que ya no tienen la suficiente energía para realizar dicho proceso.

El carácter de la producción de partículas y los procesos de decaimiento muestran que la composición de la radiación cósmica secundaria varía con la profundidad atmosférica<sup>5</sup>. El contenido de neutrones de la componente nucleónica es especialmente variable, en parte debido al decaimiento de neutrones y en parte a reacciones nucleares.

### 1.3 Espectro de Energía

El espectro de la radiación cósmica describe el flujo de partículas por unidad de energía que llega a la Tierra. Para determinar la relación intensidad vs. energía de cada componente se ha utilizado a la Tierra como un analizador magnético. El espectro diferencial de energía de los rayos cósmicos se basa en las mediciones de distintos instrumentos que cubren un rango de energía de  $10^6$  a  $10^{20}$  eV. La partícula más energética de rayos cósmicos detectada hasta hoy es de  $3.2 \times 10^{20}$  eV.

Los resultados de las mediciones de los espectros de energía de las diversas componentes de la radiación cósmica se muestran en la figura 1.4, en donde se expresa la

---

<sup>4</sup> El Bremsstrahlung es la radiación asociada con la aceleración de los electrones en los campos electrostáticos de iones y de núcleos de átomos.

<sup>5</sup> La profundidad atmosférica es la masa por unidad de área en un punto de observación, es decir, sobre un nivel dado. Así, para un absorbente de densidad constante, la masa por unidad de área es igual al producto de su espesor y su densidad.

relación de como el flujo de los rayos cósmicos  $J$  y las energías que exceden cierto límite inferior  $E$ , varían dependiendo la cantidad de energía.

El espectro presentado en la figura 1.4, puede ser representado por leyes de potencia de la forma:

$$J = K E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

Donde  $J$  es el flujo de partículas,  $E$  la energía,  $K$  y  $\gamma$  son constantes. La relación entre  $J$  y  $E$  son líneas rectas con una pendiente igual a  $\gamma$ .

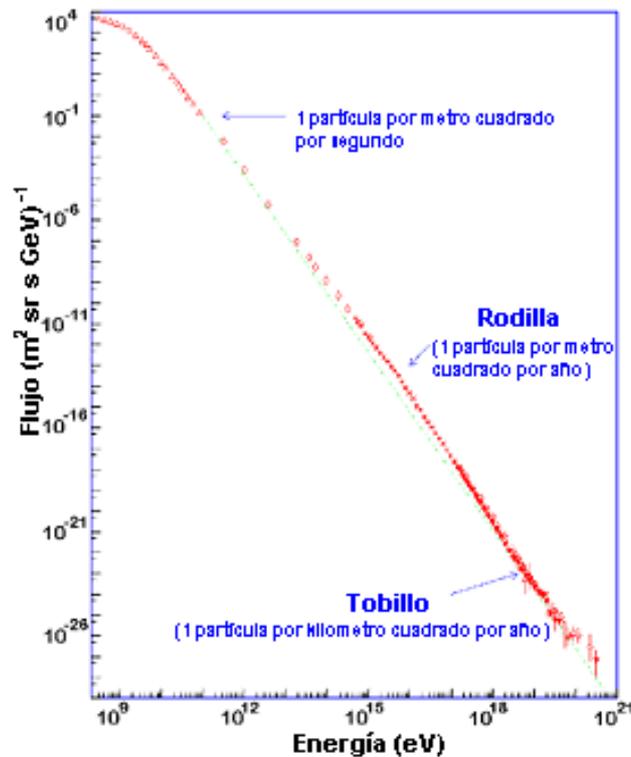


Figura 1.4: Espectro de energía de los Rayos Cósmicos.

En el espectro de los rayos cósmicos podemos ver que el aplanamiento de  $10^9$  hacia las bajas energías refleja la influencia del Sol en la propagación de estos rayos, esto es debido al campo magnético de la heliósfera<sup>6</sup> que desvía la trayectoria de las partículas que tienen energías menores a  $10^9$ . Analizando energías mayores a esta, se aprecia que el exponente  $\gamma$  no varía considerablemente, conservando una  $\gamma = 2.7$  hasta llegar

<sup>6</sup> La Heliósfera es la región alrededor del sol, rodeada por el medio interestelar local, ocupada por el plasma y el campo magnético solar.

aproximadamente a los  $10^{15}$  eV, donde cambia la pendiente del espectro y se hace más pronunciada, a esta zona se le conoce como la “rodilla”. En esta nueva pendiente el valor de  $\gamma$  es 3.1 y se conserva en el intervalo de  $10^{15}$ - $10^{19}$  eV. Alrededor de  $10^{20}$  el espectro comienza a aplanarse, formando la región conocida como el “tobillo” del espectro.

Sobre las fuentes que dan origen a los rayos cósmicos de baja energía ( $<10^{15}$ ), la contribución dominante de esta parte del espectro, son los Rayos Cósmicos Galácticos, los cuales son originados dentro de nuestra galaxia. Los Mecanismos de aceleración que envuelven choques rápidos como los remanentes de supernovas son generalmente incorporadas para explicar la ley de potencia observada posteriormente en el espectro, esta es probablemente la fuente dominante de rayos cósmicos para partículas con energías de  $\sim 10^{15}$ - $10^{17}$  eV. En el caso de las partículas con energías superiores a  $10^{17}$  eV, son referidas como rayos cósmicos de ultra alta energía, la cantidad de estos son insignificantes respecto a los rayos cósmicos galácticos, su fuente es desconocida, por lo que, solo se puede decir que probablemente son rayos cósmicos extragalácticos, debido a que sus radios de giro son comparables al radio de nuestra galaxia.

#### 1.4 Efectos del Campo Geomagnético

La Tierra tiene un campo magnético interno intenso, que a grandes distancias puede aproximarse a un campo magnético dipolar, en esta configuración las líneas ‘salen’ del polo norte y ‘entran’ en el polo sur. La intensidad del campo magnético es mayor en los polos que en las regiones entre ellos, una imagen real del campo magnético terrestre considerando la interacción del viento solar se muestra en la figura 1.5.

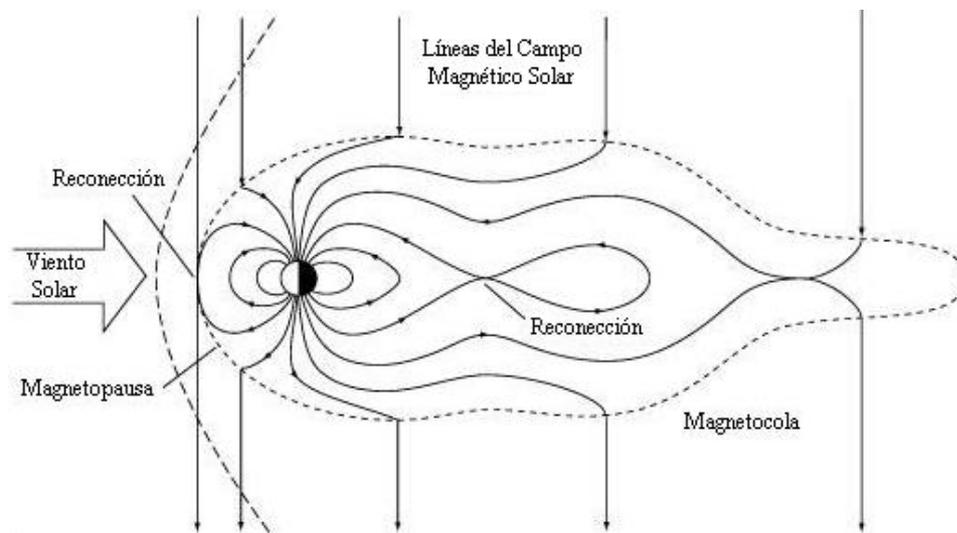


Figura 1.5: Campo magnético terrestre real.

Una coordenada útil para describir el campo es la distancia angular a partir del ecuador hacia los polos, la cual es llamada *latitud* ( $\lambda$ ) y se le agrega la palabra *norte* cuando va del ecuador hacia arriba y *sur* cuando va del ecuador hacia abajo. En la figura 1.5 se puede ver que la intensidad del campo magnético disminuye con la distancia, es decir, a una misma latitud entre más lejos se está del dipolo más separadas están las líneas de campo y por lo tanto este es más débil; como el campo magnético tiene simetría axial, la componente azimutal es cero. De esta manera tenemos que el campo magnético dipolar es función de la distancia ( $r$ ) y la latitud ( $\lambda$ ) únicamente. Este puede ser calculado por la siguiente expresión en coordenadas esféricas:

$$B = (M/r^3) (1 + 3 \operatorname{sen}^2 \lambda)^{1/2} \quad (1.2)$$

Donde  $B$  es la intensidad del campo geomagnético,  $M$  el momento magnético,  $r$  es la distancia al dipolo magnético y  $\lambda$  es la latitud.

Se supone a primera aproximación que el campo geomagnético cerca de la superficie de la Tierra es un dipolo centrado en el planeta con su eje inclinado respecto al eje geográfico  $11.5^\circ$  en  $78.5^\circ$  N,  $291.0^\circ$  E para el polo norte magnético y en  $78.5^\circ$  S,  $111.0^\circ$  E para el polo sur magnético. Hasta  $4 R_t$  ( $1 R_t \sim 6.37 \times 10^3$  Km) la aproximación dipolar es razonable pero para distancias mayores se han encontrado variaciones de su intensidad de hasta 25% del valor medido en el ecuador. Para encontrar las componentes no-dipolares que contribuyen al campo total se ha desarrollado un modelo matemático llamado modelo de multipolos que consiste en expresar el campo geomagnético en términos de una función potencial que satisface la ecuación de Laplace.

La interacción del viento solar<sup>7</sup> con el campo geomagnético genera una cavidad magnética llamada magnetosfera, además la Tierra posee cinturones de radiación que la rodean, los cuales están formados por partículas cargadas de alta energía atrapadas en el campo magnético, en general las magnetosferas muestran complejas estructuras de campo magnético y eléctrico, así como regiones diferenciadas de plasma.

La existencia de este campo magnético terrestre, provoca que las partículas cargadas provenientes del exterior sean desviadas, lo cual dificulta que puedan penetrar directamente hasta la superficie de nuestro planeta.

Es por esta razón que al hablar de propagación de los rayos cósmicos a través de campos magnéticos resulta conveniente caracterizar a las partículas por su rigidez magnética puesto que partículas con la misma rigidez seguirán trayectorias idénticas. Es importante mencionar que la rigidez magnética es considerada una medida de la resistencia de la partícula a ser desviada por el campo magnético, donde la rigidez magnética ( $R$ ) está dada por la siguiente ecuación:

---

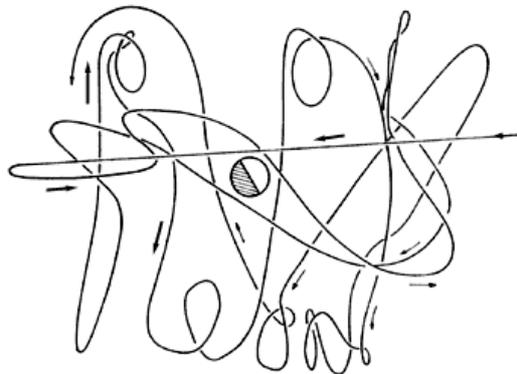
<sup>7</sup> El viento solar es un flujo de plasma ionizado y campo magnético que permea el espacio interplanetario. Este flujo es el resultado de la tremenda diferencia de presiones que hay entre la corona solar y el espacio interestelar.

$$R = pc / Ze \quad (1.3)$$

Donde  $p$  es el momento de la partícula,  $c$  la constante de la velocidad de la luz y  $Ze$  es su carga eléctrica en unidades de la carga del electrón.

### 1.4.1 Teoría de Störmer

Las trayectorias de las partículas cargadas provenientes de una fuente distante, que son atrapadas por el campo geomagnético y llegan a la superficie, su dirección de llegada no tiene que ver con la que traía originalmente, esto se ve en la figura 1.6. Para enfrentar este problema en forma correcta, es necesario seguir las trayectorias en sentido inverso. Esto es, suponer que una partícula de carga opuesta sale desde el punto de interés y analizar si finalmente ésta llega a la frontera del campo geomagnético, o si por el contrario la trayectoria analizada regresa a la superficie terrestre. En el primer caso se trata de una trayectoria *permitida*, y en el segundo caso es una trayectoria *prohibida*.



**Figura 1.6:** Trayectoria de un protón casi atrapado en el campo geomagnético. (Tomada de [51])

Las partículas cargadas en presencia del campo geomagnético, fueron estudiadas por Störmer en 1930; una de las conclusiones a las que llegó, es que para cada punto en la Tierra y para partículas positivas de una rigidez dada existe un cono (Cono de Störmer) de direcciones prohibidas, cuyo eje apunta hacia el este, por lo que, si se tratase de partículas con carga negativa el cono de direcciones prohibidas apuntará al oeste. Esta asimetría es conocida como efecto este-oeste.

Para que una partícula cargada pueda penetrar en dirección vertical hasta el ecuador se encontró que esta debe tener una energía de 15 GeV y las partículas que excedan 60 GeV pueden penetrar a la Tierra desde cualquier dirección [26].

### 1.4.2 Efecto Latitudinal

De acuerdo a la teoría de Störmer la rigidez umbral vertical se incrementa con el decremento de la latitud geomagnética. En consecuencia el flujo total de partículas primarias se decrementa de las regiones polares al ecuador. Esto constituye el efecto latitudinal que resulta en una correspondiente variación de la intensidad de la componente secundaria.

Colocando un detector de rayos cósmicos hacia una dirección determinada, por ejemplo el cenit (la vertical). Se podrá ver que el detector recibe todas las partículas de rigideces altas, como si el campo geomagnético no estuviera presente. Si medimos cada vez el flujo de rigideces magnéticas menores veremos que existe una rigidez bajo la cual no se detecta partícula alguna, a ésta se le conoce con el nombre de *rigidez umbral*. Para cada punto de la Tierra, cada dirección de acercamiento, época del año y tiempo local existe una rigidez umbral. Si desplazamos nuestro detector vertical desde el ecuador hacia los polos observaremos que la rigidez umbral se va haciendo cada vez menor, es decir, partículas con rigideces pequeñas que no pueden alcanzar puntos sobre la Tierra a bajas latitudes, podrán llegar a ésta a latitudes mayores.

### 1.4.3 Rigidez Umbral

Como se vio anteriormente el campo magnético terrestre impide a las partículas de baja energía alcanzar la superficie, y estas giran alrededor de las líneas de campo, debido a la fuerza de Lorentz. Donde el radio de giro de la partícula es dependiente de la energía y de la intensidad del campo magnético. De este modo, una partícula con mayor energía tendrá una rigidez mayor.

Para cada punto en la Tierra, existe un valor de rigidez umbral. Este valor es la energía mínima requerida para que una partícula pueda alcanzar un lugar determinado en la superficie. Una primera aproximación para calcular la rigidez de corte geomagnético o rigidez umbral ( $R_c$ ) es:

$$R_c(\gamma, \lambda) = 60 \frac{\cos^4 \lambda}{(\sqrt{(1 + \cos \gamma \cos^3 \lambda)} + 1)^2} \quad (1.4)$$

Donde  $R_c$  esta expresada en GV,  $\lambda$  es la latitud geomagnética de la estación, mientras que  $\gamma$  es el ángulo de arribo de la partícula.

La rigidez umbral es mayor para un punto cercano al ecuador que para un punto cercano a los polos, es por esta razón que entra un mayor número de rayos cósmicos por zonas polares que por ecuatoriales. Para la Ciudad de México la rigidez umbral promedio es de 8.2 GV.

## 1.5 Efectos Atmosféricos

Los efectos atmosféricos tienen un rol importante en las variaciones de la intensidad de la radiación cósmica, los cuales se calculan con base en la distribución de la presión y la temperatura.

La composición de la radiación cósmica secundaria varía a medida que esta atraviesa la atmósfera. Es por esta razón que al variar las condiciones atmosféricas, varía el registro de las partículas secundarias que llegan a los detectores de radiación cósmica en la superficie. En las siguientes secciones analizaremos la influencia de las condiciones atmosféricas sobre la componente secundaria de los rayos cósmicos.

### 1.5.1 Efecto Altitudinal

La variación de la intensidad de los rayos cósmicos con la altitud, fue determinada empleando telescopios contadores en cohetes, de esta manera la distribución normal de la intensidad fue establecida hasta una altitud de 150 km. Para encontrar la verdadera intensidad de los rayos cósmicos primarios se tienen que realizar una corrección considerando el albedo.

En la figura 1.7 se aprecia que la máxima intensidad es encontrada a una altitud de 18 km que corresponde a una profundidad atmosférica de  $80 \text{ g/cm}^2$ , donde la profundidad atmosférica ( $M$ ) es la cantidad de materia que atraviesa una partícula en determinada distancia, esto es:  $M = (\delta)(d)$ , donde  $\delta$  es la densidad y  $d$  la distancia. Este punto es conocido como máximo Pfozter. También se puede ver que la producción de partículas es iniciada a una altitud de 50 km y varía lentamente hasta los 40 km. La profundidad atmosférica a 50 km es de  $1 \text{ g/cm}^2$  y a 40 km es de  $3 \text{ g/cm}^2$ .

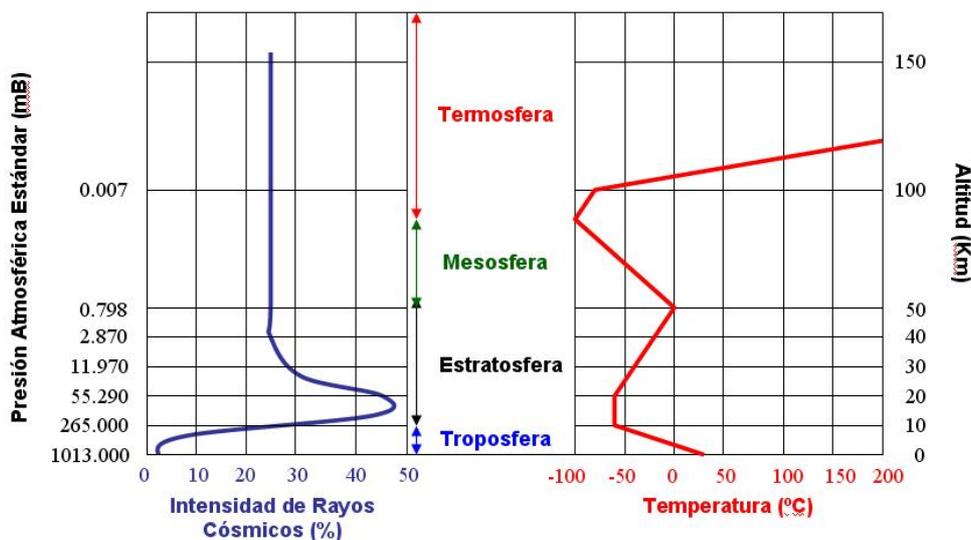


Figura 1.7: Intensidad total de rayos cósmicos en función de la altitud a 40° latitud norte.

El número de partículas secundarias pérdidas por reacciones nucleares depende de la sección eficaz de los núcleos en la atmósfera, así como también de la sección eficaz por unidad de volumen. Regularmente estas pérdidas se dan por ionización, y son función de la densidad del aire. Este efecto es global y variable, debido a que la atmósfera es inestable, y principalmente esta ligado a la formación de partículas secundarias de los rayos cósmicos,

### ***1.5.2 Efecto debido a la Humedad y a la Acumulación de Agua***

La variación de la intensidad provocada por la humedad, solo es relevante en lugares húmedos y calurosos, debido a que la acumulación de vapor de agua es mayor; mientras que en lugares situados en altas altitudes, en el invierno se presenta la acumulación de agua en forma de nieve por encima del detector, causando una absorción extra de partículas, produciendo una variación en la intensidad de la radiación cósmica del orden del 0.73%. Dicho efecto es estacional, debido a los cambios de humedad y temperatura en cada estación [15]. Sin embargo este efecto es despreciable en la Ciudad de México.

### ***1.5.3 Efecto debido a la Gravedad***

La variación ocasionada en la intensidad de la radiación cósmica por la gravedad es extremadamente pequeña, esta representa solo 0.08% por cada  $\text{cm/s}^2$  de variación en la aceleración de la gravedad terrestre [14]. Debido a que el valor de la gravedad esta muy lejos de tener un valor representativo puede despreciarse.

### ***1.5.4 Efecto debido a cambios en la Presión***

Antes de los cincuenta se pensaba que el efecto de presión o efecto barométrico era una absorción pura. Sin embargo Dorman en [15], muestra que dicho efecto consiste de tres efectos secundarios: la absorción, el decaimiento y la generación de partículas.

La absorción es un efecto negativo, producido por el incremento de la densidad del aire en la atmósfera al incrementarse la presión, lo cual provoca que las partículas tengan que atravesar una cantidad mayor de masa, originando que muchas desaparezcan en la atmósfera, entonces en los detectores se observa una reducción en la intensidad de la radiación cósmica.

El decaimiento también es un efecto negativo, este es generado por el aumento en la distancia del nivel de observación donde se producen los piones y los muones, debido al incremento de la densidad por el aumento de la presión atmosférica, lo cual origina que las partículas tengan más interacción y su decaimiento sea a una mayor altura, provocando que menos partículas lleguen al detector.

La generación es un efecto positivo, consiste en la generación de un mayor número de partículas secundarias, debido que al aumentar la presión, la densidad de masa es mayor y la probabilidad de interacción aumenta.

Observaciones realizadas a nivel del mar muestran que el efecto de generación es despreciable [15], es por esto que el efecto barométrico es considerado negativo. En el caso de los neutrones solo es importante la absorción.

Este efecto se debe principalmente a la onda diurna de presión y es muy significativo en la troposfera y parte de la mesosfera, debido a que en estas capas se da la multiplicidad de partículas. Cuya variación máxima a latitudes magnéticas como la Ciudad de México es de 0.76%/mB a una presión promedio de 760 mB [15].

### ***1.5.5 Efecto debido a cambios en la Temperatura***

El efecto de temperatura, es más difícil de medir que el efecto barométrico, debido a que el efecto barométrico se determina por un solo parámetro. Mientras que para medir el efecto de temperatura se requiere del conocimiento del estado de la atmósfera desde el punto de generación de partículas hasta donde se ubica el detector. Para determinar el perfil de temperatura atmosférica, se requieren sondeos atmosféricos en globos o mediciones hechas por satélites, esto porque la densidad atmosférica cambia con la altura, y la temperatura es diferente en las distintas capas de la atmósfera.

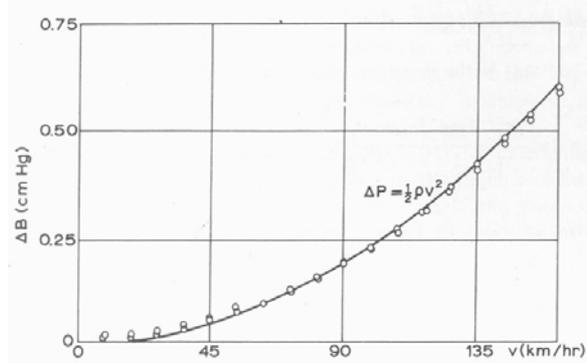
La importancia de conocer el perfil de temperaturas, es debido a que un incremento en la temperatura provoca la expansión de esta zona, lo cual ocasionara que las partículas secundarias sean generadas más arriba, ocasionando un cambio en la medición del número de cuentas detectadas.

Este efecto se debe principalmente a la variación diurna de temperatura, y es más importante en la troposfera y parte de la mesosfera, debido a que en estas capas se originan los rayos cósmicos secundarios. La variación máxima obtenida por este efecto a latitudes magnéticas como la Ciudad de México es de 0.276%/°C [15].

### ***1.5.6 La influencia del Viento***

En mediciones de la intensidad de la componente secundaria de los rayos cósmicos, se ha observado que existe una diferencia de presión por encima del aparato, respecto a la lectura del Barómetro. Esta diferencia es causada por el efecto Bernoulli, el cual es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento y es bastante grande para altas velocidades. Experimentos realizados, demostraron que la influencia del viento sobre la componente neutrónica, es fuerte para velocidades de viento  $\geq 10$  m/s (ver figura 1.12). Después de calcular el efecto barométrico y realizar la corrección debida a la presencia del

viento, el coeficiente de correlación de la intensidad de neutrones fue de 0.05, mientras que si no se considera al viento es 0.65 [37].



**Figura 1.8:** Corrección de la presión barométrica ( $\Delta B$ ) en función de la velocidad del viento ( $v$ ). (Tomada de: [37])

Para la Ciudad de México este efecto es despreciable, debido a que las velocidades promedio de viento, van de 3-15 Km/h.

## 1.6 Variaciones en la Intensidad de la Radiación Cósmica

El problema de los cambios de intensidad de los rayos cósmicos en el transcurso del tiempo, así como de las conexiones de las variaciones con factores geofísicos o astrofísicos, forman uno de los más complicados problemas que existen. Este tema toma importancia, debido a que las variaciones de rayos cósmicos, sirven para conocer las condiciones físicas del Sol en el medio interplanetario, así como en el sistema galáctico, lo cual es información adicional a la obtenida por la óptica y la radioastronomía.

El estudio de las variaciones de los rayos cósmicos se desarrolló junto con la física de rayos cósmicos en un período inicial, cuando el origen de los rayos cósmicos era el problema principal, posteriormente se prestó atención a las interacciones con la materia y a la naturaleza de las partículas, para posteriormente regresar al aspecto astrofísico de la naturaleza de los rayos cósmicos. Para su estudio se dividió en cuatro períodos, como se aprecia en la tabla 1.2.

Período	Descripción
Primero	Descubrimiento de las variaciones temporales de las intensidades de los rayos cósmicos. (1926-1934)
Segundo	Descubrimiento de las variaciones de la componente dura ( $\mu$ ). (1935-1950)
Tercero	Desarrollo de métodos para investigar variaciones de rayos cósmicos. (1951-1956)
Cuarto	Mediciones de variaciones de rayos cósmicos directamente en el espacio por medio de satélites y sondas espaciales.

**Tabla 1.1:** Períodos de estudio de las variaciones de rayos cósmicos.

Gracias al desarrollo de varios métodos de detección y registro en períodos anteriores, en la actualidad se cuenta con la tecnología necesaria para el estudio de las variaciones de la radiación cósmica.

En general, la intensidad medida por un instrumento de cualquier componente de la radiación cósmica secundaria, llamémosle *i-ésima* componente (la cual puede ser: muónica, nucleónica, electromagnética), que se encuentre a una profundidad atmosférica  $x$ , donde exista una rigidez umbral o de corte  $R_c$ , estará dada por la formula:

$$N^i(R_c, x) = \int_{R_c}^{\infty} S^i(R, x) I(R) dR \quad (1.5)$$

donde  $S^i(R, x)$  es la función de multiplicidad, la cual indica el número de partículas  $i$  formadas por un rayo cósmico primario con rigidez  $R$ , a una profundidad atmosférica  $x$ , mientras que  $I(R)$  es el espectro diferencial de los rayos cósmicos primarios.

La ecuación (1.5) proporciona la medida de la intensidad de la *i-ésima* componente de la radiación cósmica secundaria; sin embargo, como  $R$ ,  $D(R)$ , y  $S^i(R, x)$  pueden variar. Entonces las variaciones en la intensidad  $\delta N^i(R_c, x)$  estarán dadas por la ecuación (1.6).

$$\delta N^i(R_c, x) = -\delta R_c I(R) S^i(R, x) + \int_{R_c}^{\infty} \delta S^i(R, x) I(R) dR + \int_{R_c}^{\infty} \delta I(R) S^i(R, x) dR \quad (1.6)$$

Las variaciones relativas se obtienen al dividir la ecuación (1.6) entre  $N^i(R_c, x)$ :

$$\frac{\delta N^i(R_c, x)}{N^i(R_c, x)} = -W_{R_c}^i(R, x) \delta R_c + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\delta S^i(R, x)}{S^i(R, x)} W_{R_c}^i(R, x) dR + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\delta I(R)}{I(R)} W_{R_c}^i(R, x) dR \quad (1.7)$$

donde:

$$W_{R_c}^i(R, x) = \frac{S^i(R, x) I(R)}{N^i(R_c, x)} \quad (1.8)$$

La expresión (1.8) es llamada coeficiente de acoplamiento, esta es útil para obtener de forma cuantitativa información sobre las fuentes de variaciones temporales de la intensidad primaria de los rayos cósmicos, ya que es el acoplamiento entre las variaciones

primarias y las secundarias. Esto se hace para saber el número de rayos cósmicos primarios, así como para determinar su energía, y saber el número de partículas que genera cada uno.

En la ecuación (1.7) se representan todas las variaciones de los rayos cósmicos, la cual puede deberse a tres factores: Una variación en la rigidez umbral  $R_c$ , una variación en la función de multiplicidad  $S^i(R,x)$ , o bien una variación en el espectro primario  $I(R)$ . De aquí que las variaciones de la radiación cósmica se dividan en tres grupos de acuerdo a su naturaleza:

- **Grupo I.** Son las variaciones producidas por cambios en el umbral geomagnético [ $R_c$ ], como resultado de perturbaciones geomagnéticas. Estas variaciones corresponden al primer término del lado derecho de la ecuación (1.7).
- **Grupo II.** Son las variaciones relacionadas con el cambio de la multiplicidad [ $S^i(R,x)$ ], como resultado de las perturbaciones en la atmósfera terrestre, como son cambios en la temperatura, la presión, la densidad de masa, etc. Esta variación corresponde al segundo término del lado derecho de la ecuación (1.7).
- **Grupo III.** Son las variaciones asociadas con los cambios en el espectro de energía de los rayos cósmicos primarios antes de llegar a la atmósfera de la Tierra [ $I(R)$ ]. Estas variaciones están representadas por el último término de la ecuación (1.7).

A continuación se abordarán a grandes rasgos cada una de las variaciones de la intensidad cósmica. Iniciaremos por las variaciones del grupo I, que son variaciones debidas al campo geomagnético, posteriormente se verán las variaciones del grupo II, las cuales son debidas a los efectos atmosféricos, que cambian la función de multiplicidad y finalmente las variaciones del grupo III que son en el espectro primario de los rayos cósmicos, donde principalmente se debe a variaciones producidas por el sol.

### ***1.6.1 Variaciones debidas al Campo Geomagnético***

Las variaciones del campo magnético terrestre pueden ser debidas a procesos del interior de la Tierra, a procesos ionosféricos, a los anillos de radiación, o al espacio interplanetario cercano a la Tierra.

#### ***1.6.1.1 Variaciones debidas a tormentas magnéticas***

El campo magnético terrestre a sufrido cambios a lo largo del tiempo, tan solo en 3.6 millones de años ha tenido 9 cambios de polaridad, lo cual se puede ver mediante estudios paleomagnéticos, los cuales demuestran que su valor era cercano a la quinta parte del actual, también se han visto variaciones seculares en la rigidez de corte de unos cuantos

por cientos. Por otro lado, las perturbaciones del campo magnético terrestre durante tormentas magnéticas muestran que el radio de los anillos de corriente puede ser varias veces menor al radio de la Tierra. De tal forma que cuando ocurre una tormenta magnética, se espera un decremento de la rigidez de corte en todo el mundo. Y un correspondiente incremento en la intensidad de los rayos cósmicos. Evidentemente, una de las principales causas del decremento de la rigidez de corte durante tormentas magnéticas es el actual fortalecimiento del anillo de corriente en dirección oeste en los cinturones de radiación.

Para calcular las variaciones de la rigidez durante tormentas magnéticas se tomaría dentro del conteo que el campo geomagnético es confinado por el flujo del plasma solar. Pero en la ausencia de la corriente corpuscular la Tierra es permeada por el viento solar, con una velocidad de aproximadamente 300 km/s relativa a la Tierra. Entonces una cavidad es formada libre de plasma en movimiento. De la relación  $H^2/8\pi \approx nmu^2$ , donde  $H \approx 2H_0 (r_E/r)^3$ ,  $n$  es la densidad del viento solar,  $u$  es la velocidad,  $m$  la masa del protón,  $H_0$  la fuerza del campo en la superficie, el radio de la cavidad ( $r_M$ ) se encuentra mediante la siguiente expresión:

$$r_M \approx \left( \frac{H_0^2}{2\pi nmu^2} \right)^{\frac{1}{6}} \approx 10 r_E \quad (1.9)$$

Suponiendo  $n \approx 5 \text{ cm}^{-3}$  y  $u \approx 3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ . Entonces en un estado sin disturbios, la rigidez de corte, especialmente a altas latitudes, debe ser un tanto más pequeña para el dipolo. Cuando la Tierra esta en una corriente corpuscular solar con una velocidad  $u \approx 10^8 \text{ cm/s}$  y  $r_M$  se decrementa a unos cuantos radios terrestres. Estimaciones de Rothwell muestran que grandes variaciones del umbral geomagnético ocurren en altas latitudes y que variaciones grandes de las dimensiones de la cavidad debe provocar considerables cambios del umbral geomagnético, un decremento en esta dimensión corresponde a un decremento de umbral y a un incremento en la intensidad de los rayos cósmicos. La metodología mediante la cual se eliminó este efecto, es abordado en el capítulo V.

### ***1.6.2 Variaciones debidas a la Atmósfera***

El estudio detallado de las variaciones de la atmósfera, da paso al desarrollo de un buen método para procesar correcciones debidas a presión, temperatura, humedad, velocidad del viento, etcétera; si estos se aplican a datos observables, es posible encontrar una variación de rayos cósmicos de origen extra-atmosférico. Además estos efectos pueden proporcionar información, acerca de las variaciones en la atmósfera superior de la Tierra y acerca de las características de los chubascos de rayos cósmicos.

La metodología para la corrección de los efectos debidos a temperatura y presión, se presenta en el capítulo V; los efectos debidos a humedad y velocidad del viento, no se consideran, debido a que en la Ciudad de México tales efectos son despreciables.

### ***1.6.2.1 Variaciones en la Intensidad de la Componente Muónica***

Los piones son formados muy cerca de la atmósfera superior, cuando un rayo cósmico interactúa con un núcleo atmosférico (ver figura 1.2). En su viaje hacia la superficie parte de los piones serán capturados por núcleos de átomos de aire, otra parte será disociada y formará muones. En interacciones nucleares los piones distribuyen su energía entre todas las partículas generadas, por lo que este mecanismo es poco efectivo en la generación de muones de alta energía. Por lo que la principal fuente de muones de alta energía es debida al decaimiento de piones, donde los muones conservan la dirección de los piones de los cuales fueron formados (ver figura 1.3).

Las variaciones en la intensidad de los muones se debe principalmente a los siguientes factores físicos: cambios en la temperatura y en la presión, cambios en la intensidad del flujo primario, cambios en la aceleración gravitacional, así como a pequeñas variaciones en el espesor de la capa atmosférica [15].

### ***1.6.2.2 Variaciones en la Intensidad de la Componente Electromagnética***

La componente Electromagnética puede ser separada en dos partes, la parte en equilibrio, que esta en equilibrio con los muones, y la parte que no esta en equilibrio. La primera parte consiste principalmente de electrones formados por el decaimiento de los muones y de los electrones- $\delta$ , que son expulsados de átomos atmosféricos por colisiones de frente con muones, así como también los productos de multiplicación de cascadas en la atmósfera. La parte de los electrones que no están en equilibrio son formados por decaimiento de piones neutros en un par de fotones y su subsecuente cascada de multiplicación. Si la componente blanda es separada por medio de un absorbedor, entonces la componente que no esta en equilibrio contendrá nucleones también [15].

De los tres diferentes tipos de orígenes de la componente electromagnética, la que contribuye mayormente, es la debida al decaimiento de los piones neutros.

### ***1.6.3 Variaciones debidas al Sol***

Los rayos cósmicos tienen que atravesar el medio interplanetario antes de llegar hasta los límites de la magnetosfera terrestre: El medio interplanetario no esta vacío, sino que esta perneado del *viento solar*, el cual al salir del Sol por los hoyos coronales se expande y arrastra consigo al campo magnético solar. Los rayos cósmicos son guiados por el campo magnético solar hacia adentro del sistema solar, mientras que el viento solar trata de empujarlos hacia fuera. Estas dos fuerzas en competencia no son uniformes ni constantes en el tiempo, por ello, sus efectos en la intensidad de la radiación cósmica detectada en cualquier punto se manifiestan en forma de variaciones temporales, estas variaciones también son conocidas como *modulación solar de los rayos cósmicos*.

Las variaciones más importantes debidas a la modulación solar son: la variación diurna, la variación de 11 y 22 años, así como los decrementos Forbush. Estas serán descritas en los siguientes apartados.

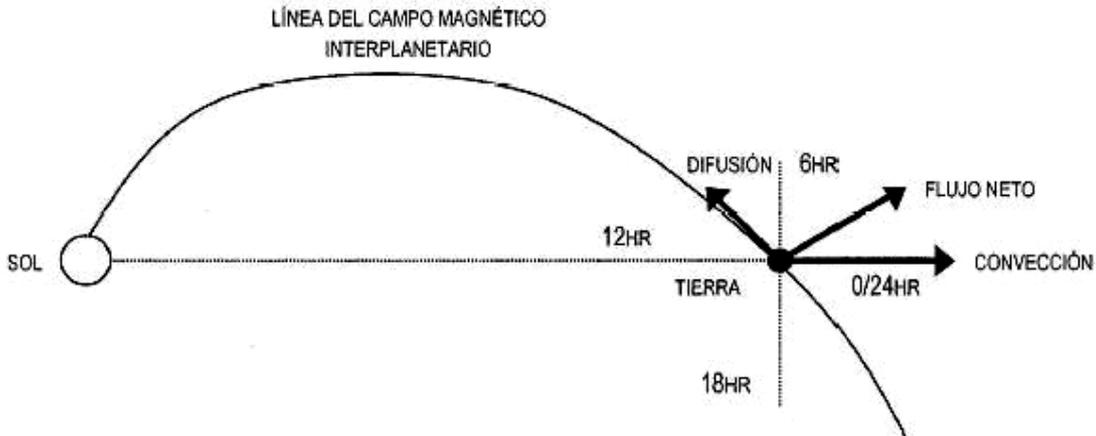
### ***1.6.3.1 Origen de la Modulación Solar de los Rayos Cósmicos***

La modulación solar de los rayos cósmicos se debe principalmente a cinco procesos físicos que ocurren en la heliósfera, estos son: 1) la convección; 2) la difusión; 3) las derivas; 4) la desaceleración adiabática; y 5) la fuente de rayos cósmicos anómalos. A continuación se explica cada una a detalle.

- 1) La convección se puede ver, cuando un rayo cósmico entra a la heliósfera, y este siente la presencia del campo magnético heliosférico, él cual esta siendo arrastrado hacia fuera, entonces este funciona como una barrera en movimiento que impide la entrada de partículas. De esta manera cuando mayor sea la velocidad del viento solar, menor será la intensidad de partículas.
- 2) La difusión es debida a que el campo magnético heliosférico presenta irregularidades, esto es, que a veces es intenso, en otras ocasiones es débil, e inclusive llega a cambiar de dirección. Estas variaciones son aleatorias. Por lo tanto las partículas que giran alrededor de las líneas del campo magnético pueden resonar con estas irregularidades y ser dispersadas, este proceso ocurre en todas direcciones. Sin embargo existe una dirección privilegiada, la del campo magnético heliosférico promedio. Si la difusión es grande, hay un incremento en la intensidad de partículas. Este proceso es opuesto a la convección.
- 3) Las derivas son debidas a que el campo magnético heliosférico esta curvado y tiene gradientes. Entonces las partículas cargadas van a experimentar movimientos de deriva de sus centros guías. Si esta ordenado el campo magnético en la heliósfera, será más importante el proceso de deriva de las partículas. Por lo tanto este es más efectivo durante el mínimo solar.
- 4) La desaceleración adiabática se produce porque la expansión del viento solar, provoca que los rayos cósmicos le entreguen energía al medio y en consecuencia se desaceleren. Este fenómeno tiene un papel importante en la heliósfera interior y es cero en la heliofunda.
- 5) Los rayos cósmicos anómalos provocan que la intensidad de la radiación cósmica varíe, debido a que ocasionan un incremento en la intensidad. Estos se producen en el choque terminal, donde partículas de muy bajas energías (algunos KeV) son aceleradas hasta varias decenas o centenas de MeV y son convertidas en rayos cósmicos.

### 1.6.3.2 Variación Diurna

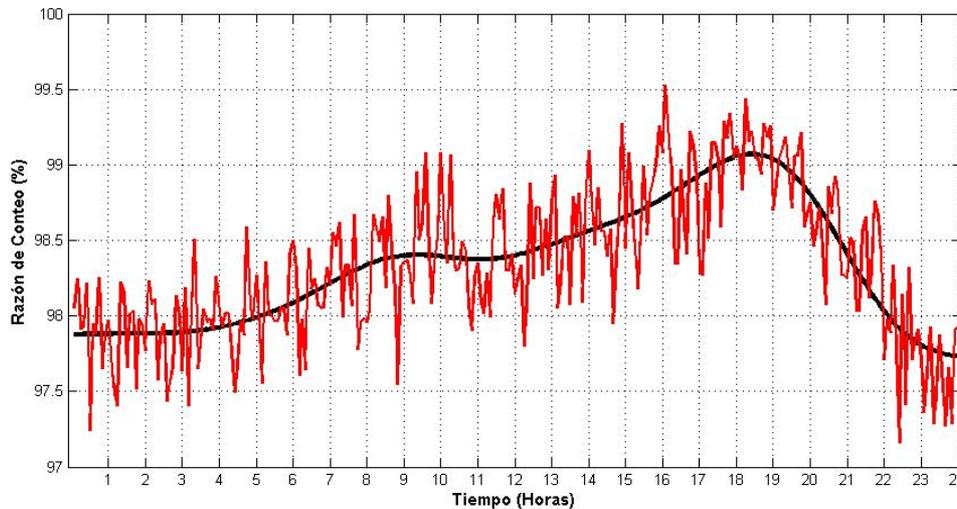
La variación diurna resulta de la combinación de los efectos de difusión de rayos cósmicos, a lo largo de la línea de campo y la convección radial del plasma solar; esto produce un flujo neto hacia un observador en el medio interplanetario, fijo en el espacio como se muestra en la figura 1.9.



**Figura 1.9:** Esquema de la anisotropía diurna de los rayos cósmicos [Tomada de los apuntes de la materia de Rayos Cósmicos].

En la figura 1.9 se muestra la diferente competencia entre la difusión y la convección, lo cual hace que la intensidad de la radiación observada en una estación terrestre, presente un máximo alrededor de las 15 horas (locales) y un mínimo sobre las 3 de la mañana. Más que una variación, este fenómeno es una característica intrínseca de la modulación. Se pueden observar variaciones a este proceso dependiendo de las derivas, los gradientes de partículas, la velocidad del viento solar, y en menor medida a la traslación de la Tierra alrededor del Sol.

Cuando se efectúan las correcciones necesarias para tomar en cuenta los efectos del campo magnético y de la atmósfera sobre los rayos cósmicos, se observa que el máximo ocurre alrededor de las 18 horas tiempo local. Haciendo estas correcciones en los datos de cada estación terrestre, se observará siempre que el máximo de intensidad se encuentra alrededor de las 18 horas en tiempo local (ver figura 1.10).

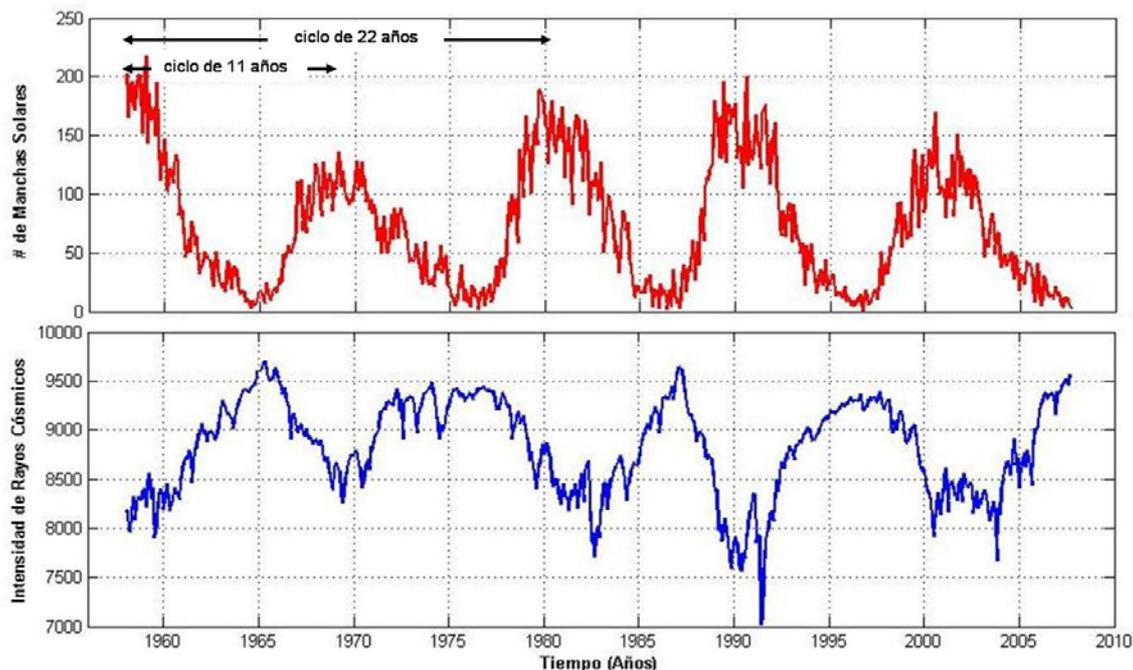


**Figura 1.10:** Variación diaria de un día típico (Datos del Telescopio de Muones de Ciudad Universitaria correspondientes al día 27 de Abril de 2004). La curva de alta frecuencia representa los datos corregidos por efecto geomagnético y atmosférico; mientras que la línea suavizada es la media móvil de los datos.

### 1.6.3.3 Variación de 11 y 22 Años

La intensidad de los rayos cósmicos sigue una variación periódica de 11 años, que es anticorrelacionada con las manchas solares (ver figura 1.11), las cuales son el principal indicador de la actividad solar. Esta ha sido observada en toda la heliósfera para partículas con energías menores a varias decenas de GeV. La variación de 22 años se debe al ciclo magnético solar. Estas variaciones en la intensidad cósmica son de más del 30% de la razón de conteo.

Estos dos ciclos, tienen lugar en el proceso de dinamo solar, es decir, en la generación del campo magnético solar. El ciclo de 11 años, es debido a que el campo magnético de gran escala cambia cíclicamente entre una configuración dipolar y una configuración multipolar aproximadamente cada 5.5 años, de esta manera se tendrá una configuración dipolar en los siguientes 5.5 años; mientras que el ciclo de 22 años, es el tiempo que tarda el Sol en tener otra configuración bipolar del mismo signo. .



**Figura 1.11:** Variación de 11 y 22 años en manchas solares (arriba) e intensidad de rayos cósmicos (abajo). Los datos son promedios mensuales de manchas solares y de conteo del monitor de neutrones de Moscú, Rusia; estos fueron proporcionados por el NOAA [II].

#### 1.6.3.4 Decremento Forbush

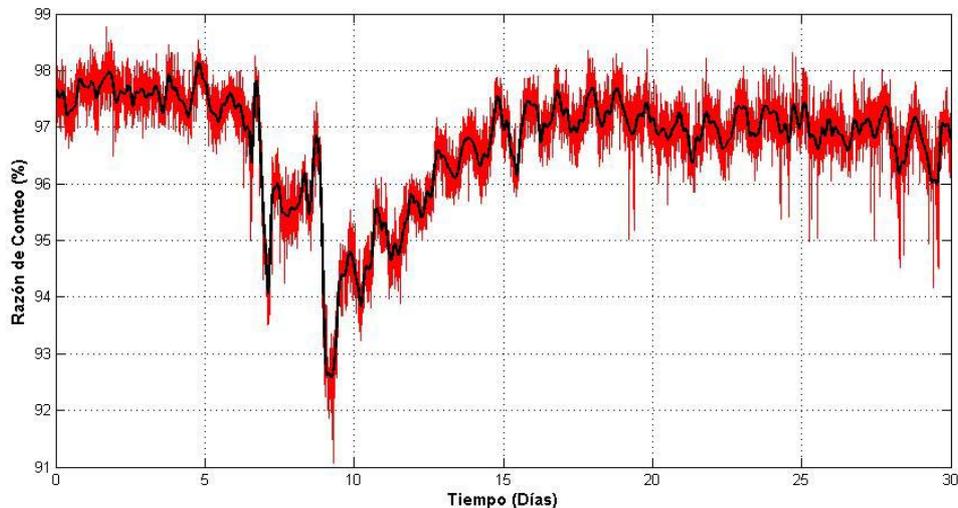
Este decremento en la intensidad de los rayos cósmicos fue descubierto en 1938, por Scott E. Forbush empleando cámaras de ionización en Tierra, notando que estos se producían uno o dos días después de una fulguración solar<sup>8</sup> o una eyección de masa coronal<sup>9</sup> (EMC), así como casi simultáneamente a las tormentas magnéticas.

Este es un fenómeno global que aparece al mismo tiempo en todas las latitudes y longitudes y sin duda es la variación más espectacular de todas, ya que en unas cuantas horas se producen disminuciones en la intensidad de los rayos cósmicos de 5 hasta 30% de la razón de conteo. La recuperación es lenta, esta puede extenderse por varios días (ver figura 1.12). Las amplitudes de los decrecimientos detectados dependen del tipo de detector utilizado, de la rigidez umbral vertical y de la profundidad atmosférica a la que el detector se encuentre. Mientras que la magnitud del decrecimiento Forbush va a depender de la región del sol donde se produzca la erupción, así como también de la época del ciclo solar en la que se producen, los mayores decrementos se presentan durante épocas de máximo solar.

<sup>8</sup> Una fulguración solar es una explosión de gas cromosférico, que puede durar desde unos cuantos minutos hasta una hora o más, la energía emitida en ese lapso de tiempo y en un área menor a la quinta parte del disco solar puede ser igual a toda la radiación captada en la Tierra en más de 300 años.

<sup>9</sup> Una eyección de masa coronal es una burbuja magnética de plasma eyectada a gran velocidad desde la corona solar.

Este fenómeno se produce cuando el Sol libera una considerable cantidad de material y produce perturbaciones magnéticas, producto de algún evento explosivo en el Sol, entonces los rayos cósmicos interactúan con este plasma y campo magnético perturbado. Esta onda de choque de plasma rápido tarda unos cuantos días en llegar a la órbita de la Tierra y va con dirección hacia afuera de la heliósfera, actuando como una *barredora magnética* y arrastrando parcialmente a los rayos cósmicos, provocando un decremento en la intensidad de los rayos cósmicos. Los decrementos Forbush menores al 10% son más recurrentes y son originados por flujos corotantes de viento solar de alta velocidad.



**Figura 1.12:** Decremento Forbush ocurrido en el mes de noviembre de 2004. La curva de alta frecuencia representa los datos corregidos por efecto geomagnético y atmosférico; mientras que la línea suavizada es la media móvil de los datos.

En la figura 1.12 se aprecian dos decrementos Forbush, esto es porque generalmente estos tienen dos componentes, o son observados con *dos escalones*. El primer escalón o decremento es debido al choque. El plasma rápido de la fulguración o EMC crea una onda de choque por delante de ellas. Esta región turbulenta de choque incluye líneas de campo magnético cerrado, por lo que, un decremento de rayos cósmicos ocurre dentro de esta región. El segundo escalón o decremento es el principal, el debido a la fulguración o EMC.

Cane explica la continuación de la fulguración o EMC en el medio interplanetario; el homólogo interplanetario de una fulguración o EMC es la *eyecta*. Cane indica que de acuerdo a la posición del observador hay tres posibilidades: El decremento de los rayos cósmicos puede ser observado con ambos, choque y eyecta; o solo el decremento del choque o solamente el de la eyecta. Donde la mayoría de los decrementos Forbush son con choque y eyecta. Y solo los más energéticos producen un solo decremento para el observador [7].

Debido a que las tormentas magnéticas se producen un poco antes o alrededor del comienzo de los decrecimientos Forbush, casi siempre se conectan estos dos fenómenos,

sin embargo su relación no es uno a uno, ya que no solo las fulguraciones y EMC, producen una tormenta magnética. En un estudio realizado por Shukla y colaboradores en [61], ellos encontraron que grandes flujos de viento solar asociados con una fulguración solar producen grandes decrementos en la intensidad de los rayos cósmicos y variaciones del campo geomagnético; sin embargo puede haber flujos de viento solar que no sean asociados a una fulguración o a una EMC, que provoquen variaciones del campo geomagnético, y no ocasionen cambio alguno a la intensidad de los rayos cósmicos.

Esta variación no es exclusivamente terrestre, puesto que mediciones realizadas por sondas espaciales en el medio interplanetario muestran también un decremento en la intensidad de los rayos cósmicos, que coinciden con un decremento al mismo tiempo en la Tierra. Esto muestra que los decrementos Forbush se producen en una gran región del espacio, lejos de la Tierra [7].

De esta manera se puede concluir que los decrecimientos Forbush no son causados por alteraciones en el campo geomagnético, ni de la atmósfera terrestre, sino más bien es debido a la modulación de la radiación cósmica galáctica en el medio interplanetario, consecuencia de un evento explosivo en el Sol o de flujos corrotantes de viento solar de alta velocidad.

## **CAPITULO II**

---

---

### **EL TELESCOPIO DE MUONES**

## 2.1 Breve Historia de los Detectores de Radiación Cósmica

El estudio de los rayos cósmicos se originó a comienzos del siglo XX, vinculado a las investigaciones sobre radioactividad que se llevaban a cabo con gran éxito en esa época.

El primer instrumento diseñado para este propósito fue el electroscoPIO, que permitía medir la ionización del gas contenido en el aparato (y, en consecuencia, la cantidad de radiación recibida) a partir de la velocidad con que las láminas cargadas del instrumento se aproximaban entre sí. Su principal aportación fue el descubrimiento de los *rayos cósmicos*.

En 1929 se crea el contador Geiger-Müller, la principal característica de estos contadores es que tenían una rápida respuesta en tiempo, y esto solo hacia posible detectar eventos individuales, cuyo tiempo de arribo podía calcularse con mucha precisión. Su desventaja es que eran muy sensibles a la contaminación radiactiva. Las principales aportaciones de este instrumento fueron: el descubrimiento de que los rayos cósmicos eran partículas cargadas y la existencia de los chubascos atmosféricos.

La cámara de niebla es un detector en cuyo interior se tiene un gas y un vapor saturado. Cuando el gas se expande súbitamente se crea un estado de sobresaturación. Si en ese momento una partícula cargada atraviesa la cámara, los iones creados en el gas, actuarán como centros de condensación y se formarán en ellos unas gotitas que harán visibles el paso de las partículas. Sus contribuciones al estudio de los rayos cósmicos fueron: la primera evidencia de la existencia de los Neutrones, el descubrimiento del positrón, el descubrimiento de los Muones, el descubrimiento de los Kaones y evidencias de las partículas Lambda.

Las emulsiones fotográficas fueron otro tipo de detector, las cuales son activadas por el paso de partículas cargadas a través de ellas dejando una pista, la cual muestra su trayectoria a través de la emulsión. Powell en colaboración con la compañía Ilford, desarrolló una emulsión nuclear especial, que era lo suficiente sensible para registrar las pistas de electrones, protones y todas las otras partículas descubiertas. Powell y su grupo de colaboradores perfeccionaron la técnica, para producir las capas de la emulsión, y obtuvieron como resultado, una imagen tridimensional de las interacciones que ocurrían en la emulsión. Es así como se descubren los piones. Además esta técnica permitió ver el decaimiento de los piones cargados en muones y subsecuentemente en electrones (o positrones) y un neutrino invisible.

La cámara de burbujas es un detector, con el mismo principio de funcionamiento que la cámara de niebla. Sólo que esta es llenada de un líquido que regularmente es Hidrogeno o Pentano. Y cuando una partícula cargada pasa a través del líquido, pequeñas burbujas de gas son producidas, dejando la trayectoria de la partícula. Con este detector un grupo de Manchester en el observatorio Pic du Midi en 1952, registran la partícula Xi. Y su decaimiento tomó lugar en una cámara de niebla, mostrando un decaimiento en cadena cuyo producto final es la producción de un protón. Finalmente en 1953 se descubre la partícula Sigma por un grupo de físicos italianos.

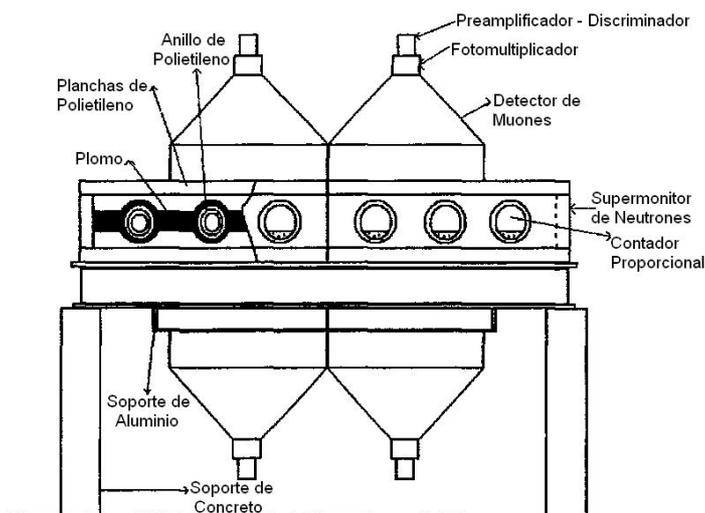
Hasta aquí llega la historia sobre los detectores empleados en el descubrimiento de los rayos cósmicos, los subsecuentes detectores que se desarrollaron fueron para aplicaciones específicas, como el estudio de las variaciones del flujo de los rayos cósmicos primarios y secundarios.

En la actualidad hay una lista enorme de detectores que se podrían mencionar, sin embargo para el estudio de la radiación cósmica que llega a la superficie, los más importantes son: las cámaras de ionización que se emplean para medir el flujo de partículas cargadas excluyendo la componente electromagnética, el monitor de neutrones que mide el flujo de neutrones, el telescopio cherenkov que mide flujo de fotones, el centellador que mide fotones y electrones; y finalmente el telescopio de muones que mide el flujo de la componente muónica.

A continuación se describe de forma detallada las características instrumentales y operacionales del telescopio de muones que trabaja en conjunto con el monitor de neutrones, el cual se encuentra localizado en Ciudad Universitaria y esta a cargo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## 2.2 Descripción del Telescopio de Muones

El telescopio de muones consiste de ocho placas de material sensible al paso de la radiación ionizante, cuatro están arriba del supermonitor de neutrones, y cuatro abajo operando en coincidencia como se muestra en la figura 2.1. La geometría del telescopio, define un ángulo sólido dentro de la cuál queda restringida la respuesta del detector, es decir solo detectará partículas que lleguen dentro de ese ángulo sólido.



**Figura 2.1:** Diagrama del Telescopio de Muones y Monitor de Neutrones de Ciudad Universitaria (Tomada de [52]).

La principal ventaja del telescopio de muones es que permite cierto grado de resolución en las características direccionales. Estas propiedades direccionales pueden ser utilizadas para distinguir entre variaciones en la intensidad de la componente secundaria de la radiación cósmica introducidas por la atmósfera o el campo geomagnético, de aquellas ocasionadas por anisotropías en el flujo de rayos cósmicos primarios.

Dado que la respuesta del telescopio es a muones positivos y negativos, que son producto del decaimiento de piones cargados, debido principalmente a interacciones de rayos cósmicos primarios de energías medias mayores a  $10^{10}$  eV con núcleos atmosféricos. La respuesta del telescopio, es relativamente insensible a partículas de baja energía de origen solar, debido a que la rigidez de corte para la Ciudad de México es de 8.2 GV.

Las observaciones de la componente muónica en la superficie proporcionan información sobre la variación en el flujo primario de los rayos cósmicos galácticos. Efectos de la modulación son observados, libres de los efectos enmascarados del flujo de partículas solares acompañantes.

Con el desarrollo de plásticos centelladores de gran área, ha sido posible no sólo obtener tasas de conteo más altas, sino que se logran también tiempos de resolución de hasta  $10^{-9}$  s, esto debido a que tienen una rápida respuesta, es decir, su tiempo muerto es muy pequeño.

## 2.3 Principio General de Detección

El principio general de detección consiste en que al pasar una partícula cargada, a través de un plástico centellador este perderá energía por ionización, excitando y disociando moléculas en una columna alrededor de su trayectoria, hasta un punto que depende de su energía, carga y del potencial de ionización promedio del material centellador. Esta energía es finalmente transferida a las moléculas del centellador y una parte de ésta es radiada, como radiación fluorescente.

Posteriormente el pulso luminoso producido en el plástico es guiado hacia un tubo fotomultiplicador, donde al llegar al fotocátodo, este libera fotoelectrones, los cuales son acelerados y multiplicados en la estructura de dínodos del tubo. El resultado de esta multiplicación es un gran pulso que llega al ánodo, donde el tamaño del pulso es proporcional a la energía liberada en el plástico centellador. La carga que se acumula en el ánodo del fotomultiplicador puede ser registrada mediante circuitos electrónicos apropiados (ver figura 2.2).

La respuesta del detector al paso de una partícula cargada es función de los siguientes factores:

- La energía depositada en el plástico centellador y la fracción de esa energía que aparece como luz fluorescente.
- La transparencia del material del plástico centellador a su propia radiación.

- La reflectividad de las paredes del contenedor y la fracción del área de las paredes que es cubierta por el fotocátodo.
- La eficiencia fotoeléctrica de los fotocátodos y las características eléctricas del tubo fotomultiplicador y circuitos electrónicos asociados.

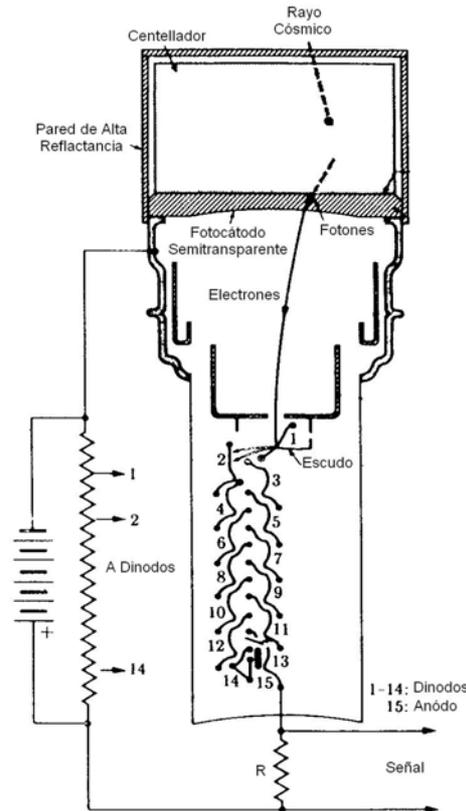


Figura 2.2: Esquema del principio de detección del telescopio de muones (adaptada de [39]).

Swanks (1954) mostró que la amplitud del pulso de voltaje a la salida del ánodo esta dada por:

$$V_{max} = \frac{N g \eta G}{c} \gamma^{1/(1-\gamma)} \quad (2.1)$$

donde  $N$  es el número total de fotones emitidos en el centellador al paso de una partícula cargada;  $\eta$  es la eficiencia cuántica del fotocátodo;  $G$  es el factor de multiplicación del tubo fotomultiplicador;  $g$  es la fracción de fotones recolectados por el fotocátodo,  $c$  es la velocidad de la luz; y  $\gamma$  es la constante de tiempo del circuito entre  $\tau$  que es el tiempo de decaimiento de la fluorescencia ( $\gamma = RC/\tau$ ). En el caso de que  $RC \gg \tau$ , entonces la amplitud del pulso será independiente de  $\tau$ .

Desde el punto de vista electrónico es recomendable tener un pulso de voltaje apreciable en el ánodo, por lo que el mejor ajuste de los parámetros anteriormente mencionado da un pulso de 150 miliVolts a la salida del ánodo, el cual es bastante adecuado para la detección de los muones.

### 2.3.1 Los Plásticos Centelladores

Los plásticos centelladores del detector son placas de 50x50x5 cm, del tipo NE 102A de Nuclear Enterprises Limited. Están hechas de polyvinyl-tolueno, en las cuales hay disuelto un centellador orgánico, el P-Terphenil. El material ha sido tratado con POPOP lo cual produce un corrimiento en la longitud de onda de máxima emisión de 3800 a 4500 Å. Esto acopla la salida del centellador con la máxima respuesta del fotomultiplicador usado.

#### 2.3.1.1 Características Físicas

Las principales características físicas de los centelladores se muestran en la siguiente tabla:

Característica	Valor
Pulso de luz	65% de la de un cristal de antraceno de la misma geometría.
Constante de Decaimiento	3 ns
Longitud de Onda de Máxima Emisión	4500 Å
Gravedad Específica	1.032 gr/cm <sup>3</sup>
Temperatura de Ablandamiento	75 °C
Índice de Refracción	1.581
No. Átomos/cm	H: 0.525 C: 0.475 N: 1.8x10 <sup>-6</sup> O: 1.8x10 <sup>-5</sup>
No. de Electrones/cm <sup>3</sup>	3.4x10 <sup>23</sup>

**Tabla 2.1:** Principales características físicas de los centelladores.

Una cantidad útil es el número de fotones emitidos por el paso de una partícula cargada a través del centellador. La cual puede calcularse, a partir de la energía perdida por una partícula de mínima ionización, al atravesar el centellador, y de la eficiencia de centelleo del plástico.

La energía perdida por una partícula cargada relativista, que pasa verticalmente a través del centellador, puede estimarse usando la expresión [57]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2Cm_e c^2 Z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{4m_e^2 c^4 \beta^4}{(1-\beta^2) I^3(Z)} \right) - 2\beta^2 \right] \quad (2.2)$$

donde  $-dE/dx$  es la energía perdida por colisión (por  $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-2}$ );  $C = r_e (NZ/A)$ , donde  $N$  es el número de Avogadro  $= 6.025 \times 10^{23}$ ,  $A$  es el número de masa efectiva del absorbente y  $Z$  es el número de carga y  $NZ/A$  es la densidad de electrones;  $r_e$  es el radio clásico del electrón ( $r_e = e^2/m_e c^2$ );  $m_e$  es la masa del electrón;  $c$  es la velocidad de la luz;  $\beta = v/c$ , siendo  $v$  la velocidad de la partícula, e  $I(Z)$  es el potencial de ionización promedio.

Sustituyendo valores para los diferentes parámetros esto es:  $m_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}$ ,  $I(Z) = 40 \text{ eV}$ ,  $NZ/A = 3.4 \times 10^{23}$ , obtenemos para una partícula de mínima ionización, que la energía perdida por  $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-2}$  es del orden de 2.18 MeV. De aquí que la energía pérdida en los centelladores usados, por una partícula de mínima ionización, sea de aproximadamente 11 MeV. Tomando la eficiencia de fotoconversión del centellador alrededor del 3-4%, se obtiene un fotón de longitud de onda de 4500 Å por cada 100 eV de energía disipada en el plástico. Por lo tanto, el número de fotones emitidos por paso vertical de una partícula cargada de mínima ionización será, de aproximadamente  $10^5$ . De estos, tan solo una fracción será recolectada en el fotocátodo del tubo fotomultiplicador. Esta fracción dependerá de las características geométricas del sistema de guía de luz empleado.

### 2.3.1.2 Sistema de Guía de Luz

El acoplamiento entre el tubo fotomultiplicador y el centellador es un factor importante, ya que de esto depende que el fotocátodo colectione la máxima cantidad de luz. El acoplamiento del sistema es directo, esto es: el fotomultiplicador está a 51.2 cm por arriba de cuatro plásticos centelladores ( $1 \text{ m}^2$  de área de centelleo), los cuales están colocados en la base de una caja piramidal de aluminio de 1.6 mm de espesor.

El interior de las cajas ha sido tratado con varias capas de pintura blanca de alta calidad y rociada posteriormente con una pintura blanca de alta reflectancia y durabilidad. Esto proporciona reflexiones difusas en el interior (coeficiente de reflexión = 0.9), lo cual asegura la uniformidad de recolección de luz para toda el área de centelleo.

La respuesta del contador dependerá de la reflectancia de las paredes de la caja y de la fracción del área de las paredes cubiertas por los fotocátodos. A partir del número total de fotones emitidos por el paso de una partícula cargada, calculado anteriormente, se puede estimar el número de fotones recolectados por el fotocátodo, para una geometría dada de la caja y un valor de reflectancia de las paredes.

Suponiendo que los plásticos centelladores no absorben ningún fotón emitido, y que la luz es isotrópica dentro de la caja después de una reflexión y que el fotocátodo absorbe toda la luz que llega. Entonces puede estimarse el número de fotones recolectados, empleando la fórmula [19]:

$$N = \frac{In}{1 - (1 - n)\iota} \quad (2.3)$$

donde  $I$  es el número de fotones liberados en el plástico,  $\iota$  es el coeficiente de reflexión de la superficie difusora y  $n$  es la razón del área del fotocátodo a la superficie difusora. Tomando valores para  $\iota$  y  $n$  de 0.9 y  $5 \times 10^{-3}$  respectivamente, obtenemos que el número de fotones que llegan al fotocátodo, por paso vertical de una partícula cargada de mínima ionización, es del orden de 2000. Sin embargo, tan sólo una fracción de estos fotones podrán desprender fotoelectrones. Esta fracción dependerá de la fotosensitividad del fotocátodo.

### 2.3.2 Los Tubos Fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores usados en el detector son del tipo 8055 de RCA, los cuales son para trabajos de coincidencias rápidas (el tiempo de levantamiento de los pulsos es de 16 ns y el tiempo de difusión de estos es de 40 ns) y características de bajo ruido. El fotocátodo es de 111.3 mm de diámetro. Tiene 10 dínodos de CsSb. La estructura de los dínodos es del tipo *persiana veneciana*, cuentan con una alta ganancia y estabilidad. Los tubos contienen un electrodo de enfoque, lo que asegura una máxima eficiencia de recolección de electrones por el primer dínodo. La corriente oscura y la fotosensitividad satisfacen los requerimientos generales.

La ganancia total del fotomultiplicador depende críticamente de la ganancia de cada etapa individual, debido a que es imposible que todos los tubos, aún siendo del mismo tipo y fabricante, tengan la misma ganancia cuando operan al mismo voltaje, por lo que es necesario que pares de tubos satisfagan estos requerimientos.

La sensibilidad del fotocátodo, dada por el fabricante, es del orden de  $110 \mu\text{A}/\text{lm}$  y la corriente oscura, a un voltaje de operación de 1 500 Volts es de 4 a 9 nA. Con esta información, se puede estimar la amplitud de la señal, al paso de una partícula de mínima ionización, a través del centellador. Donde el fotocátodo libera aproximadamente  $5 \times 10^4$  fotoelectrones. Y dado que la capacitancia distribuida del circuito es de alrededor de 200 pF, se obtiene un voltaje mínimo de salida de aproximadamente 150 mV, suficiente para la detección de muones.

## 2.4 Geometría del Sistema

Al estudiar el número de cuentas en función del voltaje aplicado al fotomultiplicador, se puede ver que una discriminación efectiva de la radioactividad de fondo se logra únicamente al operar dos o más contadores de centelleo en coincidencia. Dicho arreglo como ya se mencionó, permite obtener cierta resolución angular en las características direccionales del detector.

El telescopio esta constituido por dos capas de 4 detectores cada una, instaladas por arriba y por debajo del supermonitor de neutrones como se mostró en la figura 2.1. De esta manera, el plomo del productor en el monitor de neutrones servirá como material absorbente de la componente blanda de la radiación cósmica secundaria. Las dos capas se encuentran a 1 m de distancia, lo cual, para el caso de direcciones de incidencia vertical, nos definirá una geometría cúbica.

Los diagramas direccionales, muestran la dependencia de la intensidad de las partículas registradas por el telescopio con el ángulo cenital  $\theta$ . La importancia de estos diagramas es relevante, ya que las variaciones de origen atmosférico, dependen del ángulo de incidencia de las partículas. Como la radiación cósmica primaria es en esencia isotrópica, es posible despreciar la dependencia de la intensidad de los rayos cósmicos con el ángulo azimutal.

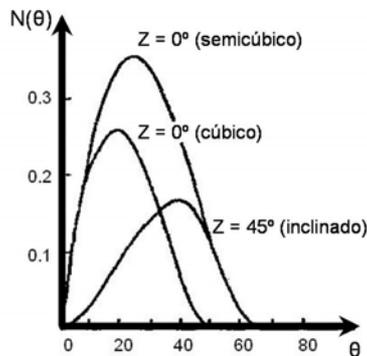
Por lo que el número de partículas registradas por un telescopio, por unidad de tiempo, incidentes bajo ángulos  $\theta$  y  $\varphi$  en los intervalos  $d\theta$  y  $d\varphi$ , será igual a:

$$N(\theta, \varphi)d\theta d\varphi = I(\theta)S_{\perp}(\theta, \varphi)d\omega \quad (2.4)$$

donde:

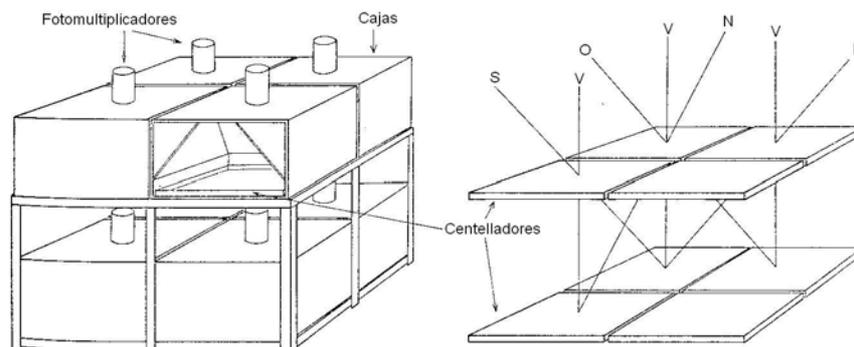
$$S_{\perp}(\theta, \varphi) = S(\theta, \varphi)\cos\theta \quad (2.5)$$

es el área efectiva perpendicular a la dirección de incidencia,  $S(\theta, \varphi)$  es el área de la superficie inferior a travesada por partículas que llegan bajo ángulos  $\theta$  y  $\varphi$  a la superficie superior;  $d\omega = \sin\theta d\theta d\varphi$  es el elemento de ángulo sólido;  $I(\theta) = I_0 \cos^2\theta$  es el número de partículas que pasan, por unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido, un área unitaria perpendicular a la dirección  $\theta$ ; e  $I_0$  es la intensidad en la dirección vertical. Otaola y colaboradores en [52], calcularon los diagramas direccionales para telescopios cúbico, semicúbico e inclinado  $45^\circ$  con la vertical, estos se muestran en la figura 2.3.



**Figura 2.3:** Diagramas direccionales  $N(\theta)$  para un telescopio cúbico, uno semicúbico y uno inclinado  $45^\circ$  con la vertical (Tomada de [52])

En la figura anterior se observa que el máximo número de partículas para los telescopios cúbico y semicúbico llegan a bajos ángulos de  $19^\circ$  y  $24^\circ$  respectivamente. Por otro lado, la geometría adoptada por el conjunto de los ocho plásticos centelladores, acoplados a doce conjuntos de circuitos de dobles coincidencias, proporciona información sobre la intensidad de la componente muónica proveniente de las cinco direcciones: vertical, norte, sur, este, oeste, como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** Geometría del sistema multidireccional del telescopios de muones (adaptada de [59]).

El registro de datos se realiza mediante coincidencias, esto es, para que un muón sea contado deberá atravesar el centellador superior, posteriormente el supermonitor de neutrones y finalmente el segundo centellador. Por lo que, la regla principal es que cruce dos centelladores, y dependiendo cuales haya cruzado se le asigna una dirección (ver figura 2.4). A parte de registrar las cinco direcciones (vertical, este, oeste, norte y sur), se registra el conteo total de los centelladores superiores, los cuales cuentan tanto la componente electromagnética, la nucleónica y la muónica.

Una forma bastante aproximada de medir la componente electromagnética, es mediante el uso del conteo de los centelladores superiores, a los cuales se les resta la componente muónica, quedando la componente electromagnética y la nucleónica, de donde la componente nucleónica esta compuesta por protones, los cuales a estas profundidades atmosféricas, su conteo es mucho menor, en comparación con los electrones, Por lo que pueden ser despreciados, y de esta manera el conteo resultante tras restar la componente de muones es una aproximación bastante aceptable de la componente electromagnética.

## 2.5 Características Energéticas

Las partículas registradas por el telescopio de muones son producidas en la atmósfera por partículas primarias de diferentes energías que llegan a ésta isotrópicamente, por lo que el número de partículas registradas por un telescopio de muones, puede ser

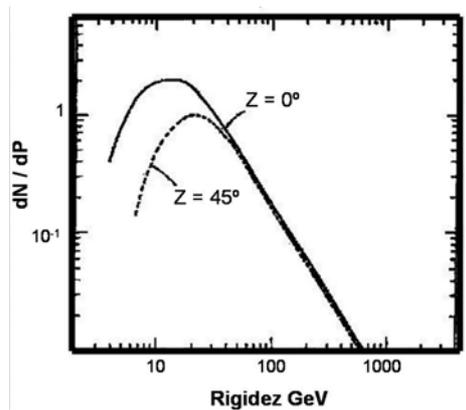
utilizado para estudiar las variaciones temporales en el flujo primario de la radiación cósmica.

Dorman mostró en [14], que las variaciones del flujo secundario de rayos cósmicos, con una rigidez umbral  $R_c$  y una profundidad atmosférica  $x$ , respecto a la variación de los rayos cósmicos primarios está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dN_{R_c}^i(x_0)}{N_{R_c}^i(x_0)} = \int_{R_c}^{\infty} \left( \frac{\delta D(\varepsilon)}{D(\varepsilon)} W_{R_c}^i(\varepsilon, x) \right) d\varepsilon \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) representa las variaciones de la componente secundaria a latitudes con rigidez umbral  $R_c$ , a un nivel de observación con presión  $x_0$ , para la  $i$ -ésima componente. El término  $\delta D(\varepsilon)/D(\varepsilon)$  representa las variaciones en el flujo primario de rayos cósmicos en función de la energía  $\varepsilon$ , a  $D(\varepsilon)$  se le conoce como el espectro diferencial de energía. El término  $W_{R_c}^i(\varepsilon, x)$  es el coeficiente de acoplamiento, y es una medida de la proporcionalidad entre las variaciones primarias  $\delta D(\varepsilon)/D(\varepsilon)$  y las variaciones secundarias  $dN_{R_c}^i(\varepsilon, x_0)/N_{R_c}^i(\varepsilon, x_0)$ ; la curva de esta función, se denomina *función diferencial de respuesta del detector*, la cual proporciona la contribución que tienen las partículas primarias de diferentes rangos de energía, sobre la intensidad total registrada por el detector.

Las funciones diferenciales de respuesta teóricas para los telescopios de muones, verticales e inclinados, que se muestra en la figura 2.5. Fueron calculados para una profundidad atmosférica promedio  $x_0 = 795.1 \text{ g/cm}^2$  (ciudad de México) y una rigidez de corte  $R_c = 8.2 \text{ GeV}$ ; a una inclinación de  $0^\circ$  y  $45^\circ$  por Otaola y colaboradores en [52].



**Figura 2.5:** Funciones diferenciales de respuesta para el telescopio de muones vertical e inclinado (Tomada de [52]).

Una vez conocidas las funciones diferenciales de respuesta se pueden determinar varias de las características energéticas del detector, la *rigidez media de respuesta* esta definida por:

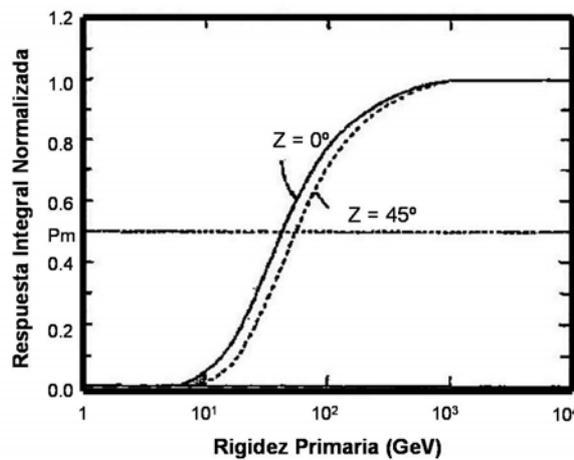
$$R_m = \frac{\int_{R_{min}}^{\infty} R_c W(R) dR}{\int_{R_{min}}^{\infty} W(R) dR} \quad (2.7)$$

donde  $R_{min}$  es la rigidez umbral,  $W(R)$  es la función diferencial de respuesta y  $R_c$  la rigidez umbral.

Se empleó el concepto de rigidez magnética en lugar de energía, por ser la rigidez, la que fija la trayectoria de las partículas en el campo magnético interplanetario. El calculo de las rigideces medias de respuesta teórica para el sistema de telescopios propuesto, se llevo a cabo integrando la ecuación (2.7) desde la rigidez umbral geomagnética determinada para la Ciudad de México, hasta aquellas energías para las cuales la respuesta del detector es ya despreciable.

Las funciones integrales de respuesta para los telescopios vertical e inclinado a  $45^\circ$  con respecto a la dirección cenital (ver figura 2.6), han sido normalizados mediante la condición:

$$\int_{R_{min}}^{\infty} W(R) dR = 1 \quad (2.8)$$



**Figura 2.6:** Funciones integrales de respuesta para el telescopio de muones vertical e inclinado (Tomada de [52]).

## 2.6 Principales Características del Sistema

Los resultados teóricos calculados para el sistema adoptado, muestran el número de cuentas promedio esperadas, así como la rigidez media de respuesta de los telescopios, el número de coincidencias y una estimación del flujo de rayos cósmicos para cada componente direccional (ver tabla 2.2).

Dirección Z	Ángulo sólido total x área $s\Omega$ ( $m^2$ sterad)	Cuentas esperadas ( $\times 10^6$ /hr)	Rigidez media de respuesta (GV)	Número de coincidencias dobles
Vertical	3.30	2.1	40.2	4
45° Norte	0.85	0.3	57.6	2
45° Este	0.85	0.3	57.6	2
45° Oeste	0.85	0.3	57.6	2
45° Sur	0.85	0.3	57.6	2
Total	6.70	3.3		12

**Tabla 2.2:** Parámetros geométricos e intensidades esperadas.

Dado que las fluctuaciones estadísticas en el número de cuentas, para un período en particular, está dado por  $\sqrt{N}$ , donde  $N$  es el número de cuentas durante el período en consideración, las fluctuaciones estadísticas para las medias mensuales y anuales de los valores horarios se dan en la tabla 2.3.

Errores	Telescopios	
	Vertical	Inclinados
En los valores horarios	0.069 %	0.183 %
En la media mensual	0.003 %	0.007 %
En la media anual	0.001 %	0.002 %

**Tabla 2.3:** Fluctuaciones estadísticas esperadas.

Ahora bien puesto que las variaciones diurna y semidiurna en la intensidad de la radiación cósmica a energías medias del espectro primario, tienen amplitudes del orden de 0.2 y 0.05% respectivamente. De la tabla 2.3 se puede ver que es posible obtener con este sistema estimaciones exactas de estas variaciones, así como una adecuada resolución contra fluctuaciones estadísticas y de ruido de fondo.

## 2.7 Electrónica Asociada

La circuitería utilizada es del tipo CMOS y LS, la cuál es bastante confiable, de bajo consumo y nos garantiza una operación sin problemas durante períodos de tiempo largos.

### ***2.7.1 Requerimientos Generales***

1. Número de cuentas lo suficientemente altas que permitan obtener una adecuada resolución contra fluctuaciones estadísticas y de fondo.
2. Una alta estabilidad instrumental.
3. Operación ininterrumpida sobre períodos de tiempo largos.
4. Eliminación de variaciones periódicas en la estabilidad instrumental que pudiera confundirse con variaciones en la intensidad del flujo primario de rayos cósmicos.

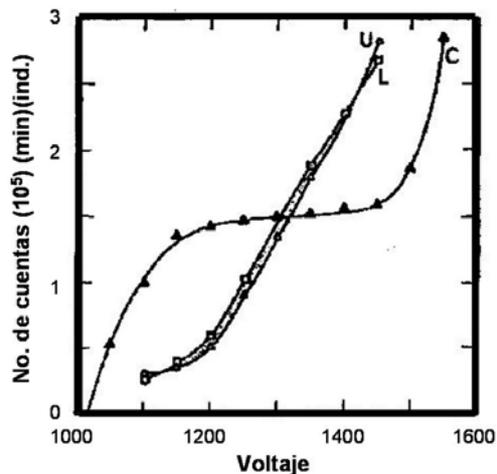
Respecto a estos requisitos, el número de cuentas está determinado esencialmente por el área del detector. Las dos principales fuentes de variaciones en las características operacionales son:

- Variaciones en el voltaje debidas a alteraciones en la demanda de consumo.
- Cambios en las características electrónicas debidas a variaciones en la temperatura del laboratorio.

Es importante asegurarse que las variaciones del voltaje son atenuadas y que los circuitos tengan coeficientes de temperatura despreciables.

En cuanto a la estabilidad instrumental, la principal causa de variaciones en ésta se debe a diferencias en la sensibilidad de los fotomultiplicadores y a cambios en la eficiencia de los detectores de centelleo. Para minimizar dichas variaciones se procedió como sigue:

- Se ajustaron los niveles de discriminación para obtener un rechazo efectivo de las cuentas individuales.
- El voltaje de alta tensión de cada fotomultiplicador, se ajusto mediante divisores de voltaje.
- El número de cuentas para cada detector individual, y en coincidencia, se obtiene como función del alto voltaje aplicado (ver figura 2.7).
- El voltaje de operación (1 300 Volts) se fijo en la meseta del contador, donde la curva es prácticamente horizontal (0.4 % / 10 V) como se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7:** Dependencia del número de cuentas de un centellador con el voltaje aplicado. Las curvas U y L, muestran la variación del número de cuentas de cada detector en el telescopio como una función del voltaje aplicado; mientras que C muestra la variación del número de coincidencias (Tomada de [52]).

### 2.7.2 Circuitos Electrónicos

En la figura 2.8 se muestra el diagrama a bloques del circuito electrónico de control de cada etapa que compone al telescopio de muones.

La primera etapa es la de detección, la cual funciona como sigue: Al pasar partículas cargadas por los centelladores, estos emiten fotones, que son recibidos por el fotocátodo de los fotomultiplicadores, entonces el pulso que sale de estos es amplificado o atenuado, ya que estos contienen limitadores de altura de pulso y un discriminador.

De esta manera los pulsos son recortados a una amplitud máxima de 350 mV por el limitador de altura. La inclusión de un discriminador a la salida, permite poder diferenciar entre aquellos pulsos producidos por la radiación cósmica, de aquellos producidos por la radiación de fondo. El discriminador excluye pulsos por debajo de 250 mV (canal 50 en la figura 2.9). Finalmente el pulso es formado.

La segunda etapa es la evaluación de los 12 conjuntos de dobles coincidencias, que posteriormente pasan a través de un mezclador, para formar las 5 componentes direccionales y finalmente ser almacenados, junto con la hora proporcionada por el reloj digital, la presión obtenida del barómetro y la temperatura sensada por el termómetro.

De esta manera se tienen registros diarios, con una tasa de muestreo de 5 minutos, que consta de la hora, los datos de rayos cósmicos de las 5 direcciones, la temperatura y la presión.

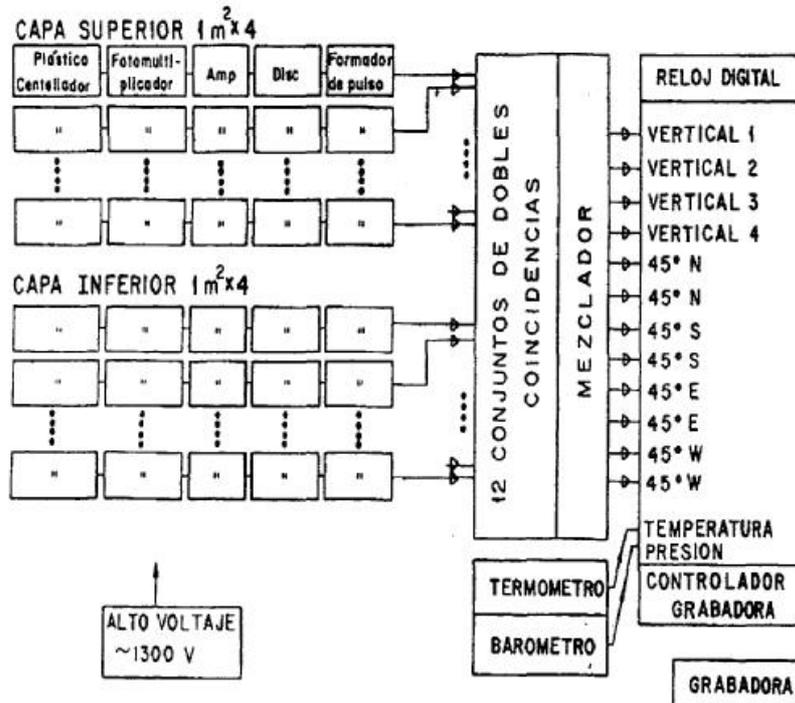


Figura 2.8: Diagrama a bloques de la electrónica del sistema multidireccional de telescopios de muones (Tomada de [52]).

El voltaje de cada tubo tiene que ser ajustado independientemente, con objeto de obtener niveles de discriminación similares para parejas de tubos. La distribución diferencial de alturas de pulso de un detector después de la etapa de amplificación se muestra en la figura 2.9.

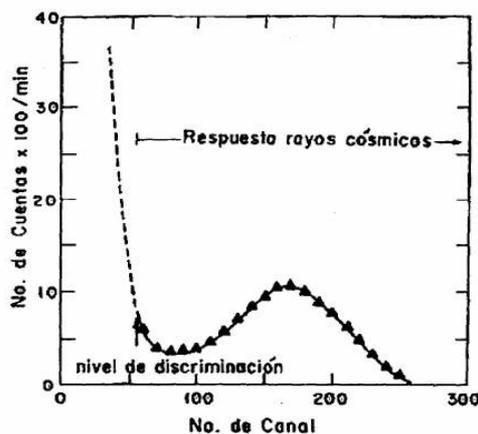


Figura 2.9: Distribución diferencial de la altura de los pulsos a la salida del amplificador (Tomada de [58]).

En la figura 2.9 el pico del lado derecho es debido a partículas de la radiación cósmica, mientras que la subida en la región de baja altura del pulso es debida principalmente a la radiación  $\gamma$  de fondo.

## **CAPITULO III**

---

---

# **LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS**

### 3.1 El Circuito Eléctrico Global

La Tierra está eléctricamente cargada y actúa como un enorme capacitor esférico, lo que da origen al Circuito Eléctrico Global. Por una parte, la Tierra tiene una carga neta negativa de aproximadamente un millón de coulombs, por otro lado, una carga positiva de igual magnitud reside en la atmósfera, lo cual da origen a que exista un flujo de corriente entre la Tierra y la atmósfera (esto es la atmósfera inferior, la ionosfera y la magnetosfera).

La resistividad de la atmósfera decrece con la altura, a una altitud cercana a los 48 kilómetros, la resistividad es más o menos constante, debido a que hay partículas ionizadas. A esta región se le conoce como electrosfera. Entre la Tierra y la electrosfera existe una diferencia de potencial de cerca de 300 000 volts, con lo cual se tiene un campo eléctrico promedio de cerca de 6 V/m en toda la atmósfera. Cerca de la superficie, en buen tiempo la fuerza de campo eléctrico es de 100 V/m.

Dado que la atmósfera no está completamente aislada, existe una pequeña corriente entre la Tierra y la electrosfera, debida a que la carga negativa de la Tierra escapa y asciende a la electrosfera. Esto es conocido como el buen tiempo eléctrico, la corriente generada es cercana a 2 000 amperes en cualquier momento. A esta razón, la carga de la Tierra sería disipada en menos de una hora, sin embargo esto no sucede, porque la principal fuente de carga de la Tierra en la baja atmósfera son las tormentas eléctricas, las cuáles producen cerca de 50-100 descargas eléctricas de las nubes a tierra cada segundo, lo cual recarga a la Tierra, ya que se liberan cargas negativas hacia la superficie (Ver figura 3.1), otras fuentes de carga de importancia menor son el dínamo ionosférico y el magnetosférico.

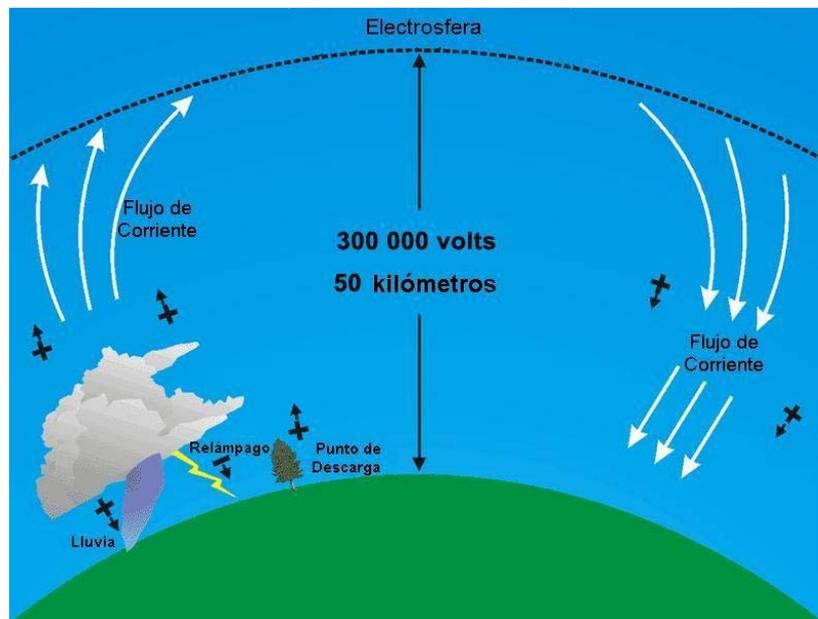


Figura 3.1: El Circuito Eléctrico Global.

Las tormentas eléctricas están asociadas a la actividad convectiva. Las nubes cumulonimbus son las formas más grandes de nubes convectivas y típicamente producen descargas eléctricas. De esta manera, una tormenta eléctrica es una nube cumulonimbus que produce descargas eléctricas (rayos); y se define como una nube que produce truenos, debido a que los truenos son la evidencia audible de que existe actividad eléctrica, y estos son producto de los relámpagos o rayos.

Existen tres tipos de tormentas eléctricas: las de celda simple, las de multicelda y las de supercelda como se muestra en la figura 3.2. Estas categorías son producto de la variación de los perfiles atmosféricos, los cuáles tienen que ver con los desplazamientos verticales.

Las tormentas eléctricas menos severas son las de celda simple, estas se componen por una unidad de convección, la cual es típicamente de algunos kilómetros de diámetro, se caracterizan por fuertes corrientes ascendentes ( $\geq 10$  m/s), su vida media es del orden de una hora. Por otro lado las tormentas multicelda consisten de una sucesión de celdas convectivas en diferentes fases de evolución, donde cada celda tiene una vida media de 30 minutos. Mientras que las tormentas supercelda son las más severas, debido a que tienen celdas de larga vida con fuertes corrientes ascendentes, estas pueden llegar a producir múltiples tornados y durar varias horas.



**Figura 3.2:** Tipos de Tormentas Eléctricas.

### 3.2 Generalidades sobre las Tormentas Eléctricas

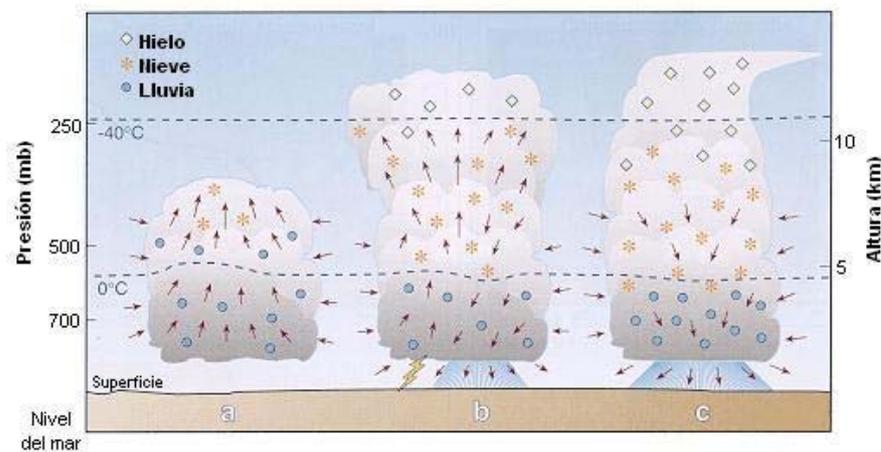
Las tormentas eléctricas solo se producen en nubes de crecimiento vertical o convectivas. Para que la convección suceda regularmente debe establecerse una diferencia de temperatura; por ejemplo: si estamos en una región costera, esta se dará, cuando la superficie de la Tierra sea calentada por la radiación solar, a una temperatura mayor que la del agua; similarmente se da en la zona continental, ya que las montañas son calentadas, antes que los valles, lo cual provoca la convección de aire inestable. Otra forma es cuando el viento horizontal, al encontrarse con una montaña es dirigido hacia arriba y contribuye a la convección vertical de parcelas de aire, este efecto es referido como efecto orográfico.

Las tormentas eléctricas de pequeña escala se desarrollan en los meses de primavera y verano cuando el potencial para la convección es más grande y hay un adecuado vapor de agua disponible; las tormentas de mayor escala son asociadas con la elevación de aire caliente, tal y como ocurre a lo largo de un frente o en la ladera de una montaña; con

frecuencia los vientos divergentes contribuyen a la formación de estas tormentas, porque estos tienden a extraer el aire de los niveles más bajos hacia arriba por debajo de ellos.

### 3.3 Evolución de las Tormentas Eléctricas

La vida de una tormenta eléctrica consta de tres fases o etapas: la fase de formación, la fase de madurez y la fase de disipación. Las cuales abordaremos en este apartado, desde una perspectiva de una celda simple, para facilitar la explicación.



**Figura 3.3:** Evolución de una nube de tormenta eléctrica. (a) fase de formación de una nube de tormenta; (b) fase de madurez de la nube de tormenta; (c) fase de disipación de la nube de tormenta.

#### 3.3.1 Fase de Formación

La fase de formación o etapa de cúmulo se inicia debido al calentamiento diferencial existente en la superficie, la parcela de aire caliente y húmedo flota, ascendiendo debido a una aceleración radial. Cuando el aire alcanza la saturación, una nube convectiva empieza a crecer, como la parcela de aire caliente continua creciendo, más vapor de agua se condensa, liberando calor latente de vaporización. Este calor latente amplifica la convección, acelerando dicho proceso. Los bordes de la nube durante esta fase son definidos y distinguibles, indicando que la nube esta compuesta primariamente de gotas de agua. La nube convectiva continua creciendo hacia arriba, una vez sobrepasando el nivel de congelación algunas gotitas son congeladas, mientras que otras moléculas de agua son depositadas sobre núcleos de condensación, formando de esta manera cristales de hielo; otras gotitas de agua más pequeñas son sobreenfriadas, de esta manera se tiene que ambas partículas coexisten (Ver figura 3.3a).

### **3.3.2 Fase de Madurez**

La fase de madurez es caracterizada por la presencia de dos corrientes dentro de la nube, esto es una corriente ascendente y una corriente descendente. La corriente hacia abajo es iniciada por el arrastre de partículas que caen, debido a que en el trayecto hacia arriba fueron creciendo, formando una variedad de partículas de agua como: copos de nieve, graupel, granizo, etc. De tal manera que llega un momento en el que, la corriente ascendente no puede soportarlos y empiezan a precipitarse. Algunas partículas de agua sólida al ir bajando, debido a que se incrementa la temperatura pueden llegar a fundirse y se convierten en gotas de agua nuevamente, produciendo de esta manera la lluvia. La corriente descendente es fortalecida por el enfriamiento. Las descargas de la nube a tierra comúnmente comienzan cuando la primera lluvia cae desde la base de la nube. En esta etapa la celda alcanza su máxima altura, hasta la región inestable, que a menudo es en la base de la estratosfera, por lo que la corriente ascendente se extiende lateralmente formando el característico yunque ( Ver figura 3.3b).

### **3.3.3 Fase de Disipación**

La fase de disipación se caracteriza porque la corriente descendente crece, debido a que empieza a penetrar aire frío de la parte superior de la nube. Después se empieza a debilitar debido a que las gotitas sobreenfriadas se empiezan a congelar, por lo que, la temperatura de la nube disminuye, debido a que contiene una mayor cantidad de cristales de hielo, copos de nieve, graupel, granizo, etc. La nube empieza a desaparecer, porque no existe calor latente adicional, este fue liberado cuando las gotitas de nube fueron congeladas. La disipación de la tormenta eléctrica puede también ser iniciada si la precipitación dentro de la tormenta empieza bastante fuerte como para que la corriente ascendente pueda soportarla, o bien cuando la fuente de humedad desaparece, o si la corriente ascendente cesa (Ver figura 3.3c), entonces la nube empieza a evaporarse.

## **3.4 Estructura Eléctrica de las Tormentas Eléctricas**

La distribución y movimiento de las cargas eléctricas en una tormenta eléctrica, reside principalmente sobre los hidrometeoros<sup>1</sup>, donde algunos liberan iones, esto es complejo y cambia con el desarrollo de la nube. Los hidrometeoros cuyo movimiento es principalmente influenciado por la gravedad (con velocidades de caída  $\geq 0.3$  m/s) son llamados partículas de precipitación. Todos los demás hidrometeoros son llamados partículas de nube. Las características básicas de la estructura de carga de la nube, incluye un arreglo de cargas positivo cerca de la parte superior de la nube, un arreglo de cargas negativo en la parte media de la nube y una carga adicional positiva en la parte inferior de la nube. Es muy probable que ambas cargas coexistan en cualquier parte de la nube, independientemente del arreglo de carga de la región. La pequeña carga positiva en la parte

---

<sup>1</sup> Los hidrometeoros son partículas de agua en estado líquido o sólido (gotitas de agua sobreenfriada, cristales de hielo, graupel, granizo, etcétera).

inferior es probablemente acarreada por la precipitación, otros orígenes serán discutidos más adelante.

### 3.4.1 Distribución de Carga

El modelo clásico de la estructura de carga de una nube de tormenta puede ser aproximado a una pila vertical de tres centros de carga, positiva (P) en el centro de la parte superior de la nube, negativa (N) en el centro de la parte media de la nube y una pequeña carga positiva (p) en la parte baja de la nube como se muestra en la figura 3.4. Las dos cargas superiores son comúnmente llamadas cargas principales y son casi especificadas para ser de la misma magnitud, la carga positiva inferior puede no siempre estar presente. Las dos cargas principales forman un dipolo, el cual es positivo porque la carga positiva esta sobre la negativa (tiene un momento dipolar hacia arriba), la pequeña carga positiva de la parte inferior de la nube forma un doble dipolo. Ambas estructuras dipolar y de doble dipolo pueden utilizarse para describir la estructura general de la nube de tormenta. Aproximadamente las cargas y altitudes respecto al nivel de la superficie, para las regiones p, N y P de una típica nube de tormenta son: 3 coulombs a 2 Km., - 40 coulombs a 7 Km. y + 40 coulombs a 12 Km. Estos valores son representativos, puesto que varían considerablemente con la geografía y de nube a nube; además de la función de evolución temporal de la nube.

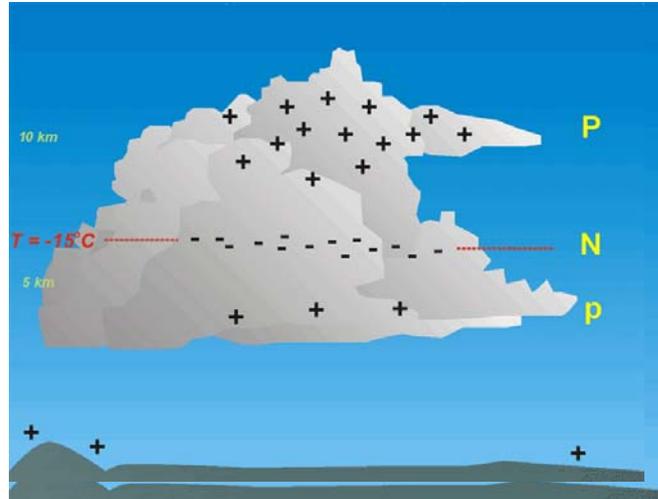


Figura 3.4: Distribución de carga.

### 3.4.2 Mecanismo de Generación de Cargas

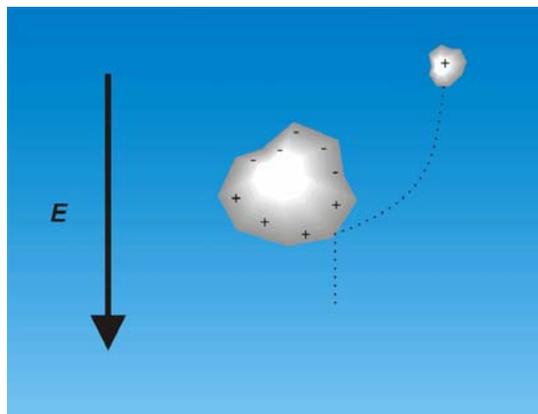
No es del todo conocido como una nube de tormenta eléctrica obtiene su carga. Sin embargo se detallarán las dos teorías generales que mejor explican como se genera la carga requerida para la electrificación de una nube de tormenta. Una es la teoría convectiva y otra

es la teoría de colisión entre el granizo y los cristales de hielo, este proceso también es referido como hielo-hielo [55].

La teoría convectiva se basa en el principio de funcionamiento del generador de Van der Graff. En este aparato se *rocía* una carga eléctrica positiva o negativa, por medio de un transformador de alta tensión, sobre una cinta móvil sin fin de goma, que transporta las cargas, o iones. Esta teoría supone que las cargas eléctricas de la nube proceden, inicialmente, de dos fuentes externas: los rayos cósmicos y de un intenso campo eléctrico. Los rayos cósmicos inciden sobre las moléculas de aire por encima de la nube y lo ionizan. La segunda fuente es el intenso campo eléctrico que se presenta sobre objetos puntiagudos de la superficie de la tierra; este campo produce lo que se conoce en la literatura de la alta tensión como *descarga de corona* de iones positivos.

El aire caliente los transporta hacia arriba por convección y actúa como la cinta del generador de Van der Graff. Una vez han alcanzado las regiones superiores de la nube, esos iones positivos atraen a los negativos que los rayos cósmicos habían formado por encima de la nube de tormenta. Los iones negativos penetran en la nube y son capturados rápidamente por gotitas de agua o cristales de hielo, quedando cargados negativamente, posteriormente son movidos por las corrientes convectivas de la nube para producir las regiones de carga.

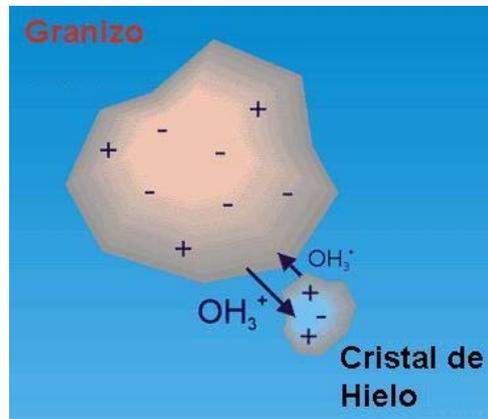
En el caso de la teoría hielo-hielo, este es un proceso no inductivo, lo cual indica que los hidrometeoros no requieren ser polarizados por el campo eléctrico ambiental, sino que existe un intercambio de carga entre partículas de diferente tamaño por colisión, esto se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5:** Proceso de carga no inductivo.

La efectividad del proceso hielo-hielo yace en las propiedades termoeléctricas del hielo. La movilidad de las partículas del  $(OH_3)^+$  en el hielo es mayor que la de las partículas del  $(OH)^-$  [54]. Cuando el granizo y el cristal de hielo entran en contacto, esto es porque la corriente de aire ascendente, ya no puede soportar al granizo, y este empieza a caer por acción de la gravedad, una carga positiva fluye rápidamente de la granizo al cristal de hielo,

quedando el cristal de esta manera cargado positivamente. Este es el escenario típico dentro de la nube, donde un granizo adquiere una carga negativa cuando interactúa con cristales de hielo frío al caer (Ver figura 3.6).



**Figura 3.6:** Interacción Granizo-Cristal de Hielo.

Hasta hoy no existe una teoría de generación de la carga de una tormenta eléctrica haya sido completamente comprobada. Tal es el caso de la teoría de convección, que indica que esta misma transporta la carga a la parte superior de la nube, esto experimentalmente esta comprobado. Sin embargo el campo eléctrico medido en estos experimentos resulta unas mil veces menor que el necesario para iniciar una descarga eléctrica atmosférica. Por consiguiente, estos experimentos no demostraron directamente el papel de la convección en tormentas eléctricamente activas y no se podía afirmar que los experimentos corroboraran la teoría de la convección. Por esta razón, el modelo de convección perdió crédito y es más aceptado el mecanismo hielo-hielo, debido a que es el que más favorablemente explica el mecanismo de electrificación.

### ***3.4.3 El Origen de la Carga Positiva en la Parte Inferior de la Nube***

Existen muchas hipótesis sobre el origen de esta carga positiva. Jayaratne y Saunders en [27], sugieren que el graupel, se carga positivamente a temperaturas calientes, debido a la inversión de la temperatura, y se deposita en la parte inferior de la nube, siendo de esta manera el responsable de la formación de esta carga. Además Marshall y Winn en [47], Marsh y Marshall en [44] expusieron que el mecanismo de Jayaratne y Saunders requeriría una combinación poco probable de valores extremos de los varios parámetros de los modelos de carga para explicar las cargas observadas en la parte inferior de la nube. Marshall y Winn en [46], presentaron evidencias de que la carga positiva fue depositada por una descarga eléctrica. Marsh y Marshall en [44], observaron la carga positiva en la parte inferior de la nube antes de una descarga eléctrica. Malan en [42], sugirió que esta carga positiva inferior contenía la carga que era producida por la corona a tierra, la cual era subsecuentemente acarreada dentro de la nube por conducción o convección, Chauzy y Soula en [11], presentaron cálculos que sirven de soporte a esta hipótesis. Phillips en [53],

especulaba que sobre una tierra teórica, la carga positiva en la parte inferior de la nube se explicaba completamente por una capa de apantallamiento en la frontera inferior de la nube. Marshall y Stolzenburg en [45] y Bateman y colaboradores en [6], encontraron en las tormentas eléctricas de Nuevo México, que la carga positiva en la parte inferior de la nube fue acarreada principalmente por precipitación. Marshall y Stolzenburg en [45] reportaron en dos sondeos de nubes cargadas positivamente que las partículas contribuyen de un 20 a 50 por ciento de la densidad de carga total.

### 3.5 Descarga Eléctrica

Las cargas que se forman en la nube de la tormenta eléctrica son acumuladas, debido a que el aire es un buen aislante, de tal manera que se forman grandes diferencias de potencial. Y a su vez los campos eléctricos generados por estas cargas acumuladas empiezan a ser demasiado intensos (típicamente 3-4 kilovolt/cm a la altura de la carga negativa de la nube), el aire entonces llega a un punto de ruptura en el cual conduce y hay un intercambio de carga dentro de la nube o hacia tierra, la carga es neutralizada y se genera una descarga eléctrica.

#### 3.5.1 Tipos de Descarga

La descarga eléctrica puede ocurrir por cuatro caminos. Es decir la descarga puede ser: dentro de la nube, de una nube al aire, de una nube a otra nube adyacente, y de una nube a tierra (ver figura 3.7). Estas descargas son nombradas: intranube, nube-aire, nube-nube y nube-tierra, respectivamente.

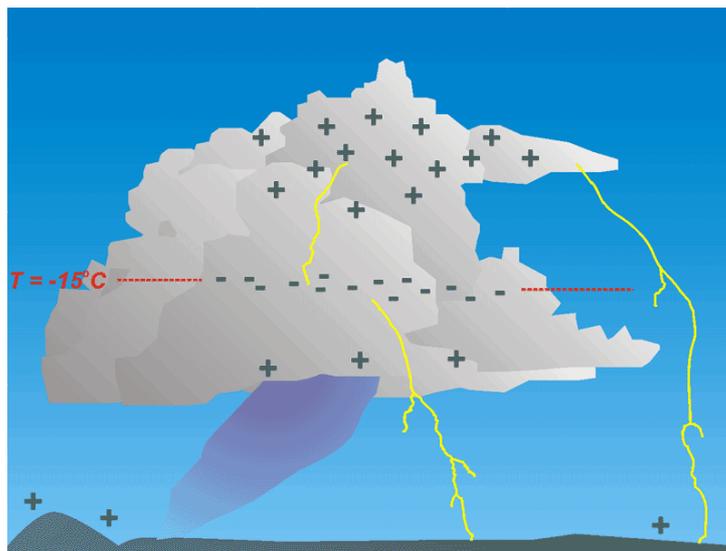


Figura 3.7: Tipos de descarga.

Una descarga intranube, redistribuye la carga dentro de la nube, de igual forma las descargas nube-nube, redistribuye la carga entre las nubes, estas dos descargas son las más frecuentes, puesto que representan el 80% de las descargas totales [67]. Mientras que las descargas nube-aire son menos comunes. Para la aviación, estas tres descargas tienen un pequeño efecto sobre las personas.

En el caso de las descargas nube-tierra estas vendrían cerca del 20% de las descargas, estas son las más documentadas. Debido a que intercambian carga entre la nube y la superficie de la Tierra. Estas descargas afectan gravemente a las personas, causando heridas y hasta la muerte, trastornan la energía y las comunicaciones, además de provocar incendios forestales.

La descargas nube-tierra pueden ser de carga positiva o carga negativa como se muestra en la figura 3.7, dependiendo de la fuente de descarga. Esta puede ser determinada por la polaridad de la corriente que golpea. Las características de estas tormentas se aprecian en la tabla 3.1.

<b>Característica</b>	<b>Tipo de Descarga</b>	
	<b>Negativa</b>	<b>Positiva</b>
Porcentaje de ocurrencia	90	10
Corriente pico promedio	30	35
Vida media de la corriente promedio	30	230
Número de retornos promedio	3-4	1
Porcentaje de corriente continua contenida	20	80

**Tabla 3.1:** Características de descargas nube-tierra negativas y positivas.

Las descargas nube-tierra se dan hacia abajo y hacia arriba, regularmente estas se originan de las nubes, sin embargo, también pueden originarse de la tierra. Las descargas positivas nube-tierra, son menos comunes que las negativas. Estas solo representan el 10 % de las descargas de nube-tierra.

### **3.5.2 Mecanismo de Generación**

Cuando el campo eléctrico se intensifica, los electrones presentes en la atmósfera pueden ser acelerados a energías tales que pueden arrancar electrones de las moléculas. De esta manera los nuevos electrones libres chocan con más moléculas, tal que un gran número de electrones son liberados en un corto período de tiempo (algunos milisegundos). Entonces, una corriente eléctrica intensa puede fluir entre la superficie de la Tierra y la nube o entre el tope de la nube y el centro de la misma.

La formación de las descargas eléctricas o rayos implica la formación de un flujo electrónico líder o guía, dependiendo del potencial generado es la luminosidad, estas pueden tener una velocidad del orden de  $c$  (donde  $c$  es la velocidad de la luz). Conforme los

electrones se aproximan a tierra, un flujo de carga positiva se emite por objetos como árboles. Cuando el flujo guía y el flujo positivo emitido se conectan, la carga fluye a lo largo de la trayectoria de la guía y ocurre la descarga eléctrica.

A medida que los electrones chocan con átomos y moléculas del aire, éstos últimos absorben energía y son excitados, por lo cuál tienen que emitir fotones para retornar a su estado original de energía, dando origen a los relámpagos.

## **3.6 El Trueno**

El trueno puede ser definido como una emisión acústica asociada con una descarga eléctrica. Este aparece en todos los procesos impulsivos, tanto en descargas de nube a tierra, como en descargas dentro de la nube, así como en los procesos de tipo componente M (La componente M es una perturbación que surge en un estado relativamente de corriente continua y esta asociado al canal de luminosidad, esta sirve para transportar carga eléctrica negativa de la nube a tierra).

La parte significativa del espectro de un trueno se extiende de unos hertz a unos cuantos kilohertz. De modo general un trueno audible ( $\geq 20$  Hz) es una serie de ondas de choque degeneradas producto de la expansión dinámica del gas de varias porciones que son rápidamente calentadas por el relámpago; mientras que un trueno infrasónico ( $\leq 20$  Hz) es asociado con la repentina contracción de grandes volúmenes de la nube de tormenta eléctrica cuando la descarga eléctrica remueve rápidamente la carga de este volumen.

### ***3.6.1 Mecanismo de Generación***

El trueno comúnmente se divide en dos categorías: I. Audible, energía acústica que puede escucharse; II. Infrasónico, energía acústica que es menor a la frecuencia, que el oído humano puede detectar, generalmente 20 Hz. o menor. Esta división que se basa en las propiedades del oído humano, no necesariamente se traduce dentro de diferentes mecanismos de generación de truenos.

El origen del trueno más audible se piensa que es por la expansión del canal de descarga eléctrica debido a un rápido calentamiento (10 000 a 30 000 K), a pesar de que algunos truenos infrasónicos también son generados por este mecanismo. El origen de más truenos infrasónicos es postulado como: la conversión a sonido de la energía almacenada en el campo electrostático de la nube de tormenta cuando el relámpago rápidamente reduce este campo de la nube, este mecanismo también puede producir truenos audibles.

#### ***3.6.1.1 Generación de Truenos Audibles***

La transformación de la energía almacenada en un relámpago en energía audible se conoce como trueno. La descarga de retorno deposita rápidamente una gran cantidad de

energía a lo largo del canal del líder. Este canal es calentado por la entrada de energía por encima de los 25 000 K. El calentamiento de una sección corta, por ejemplo 10 metros del canal, toma alrededor de una millonésima de segundo; entonces, la sección del canal no tiene tiempo para expandirse mientras está siendo calentada.

El aire calentado de una temperatura ambiente a más de 25 000 K, no tiene tiempo para expandirse, por lo que se provoca un aumento considerable de la presión, por encima de la presión atmosférica. La presión inicial del canal de la descarga de retorno queda por encima de las 10 atmósferas y puede llegar hasta las 100 atmósferas o más. La alta presión del canal expande rápidamente el aire circundante (inicialmente a la presión atmosférica) y lo comprime. Esta perturbación del aire (expansión – compresión) se propaga en todas las direcciones. Aproximadamente en los primeros 10 metros esta perturbación se propaga como una onda de choque y luego como una onda de sonido ordinaria.

El sonido del pulso de una pequeña sección del canal del rayo viaja a una velocidad cercana a los 340 m/s a condiciones de nivel del mar. De esta manera el trueno que se escucha son variaciones de presión inducidas en el aire por la expansión de cada parte del canal del rayo, debido a su alta presión inicial.

Debido a que el sonido en el aire viaja a 340 m/s y la descarga de retorno calienta el canal del rayo en menos de una milésima de segundo, para todos los propósitos prácticos cada punto del canal del rayo puede ser considerado como un emisor de un pulso de sonido (u onda de choque) al mismo tiempo. Como la luz emitida por el canal de la descarga de retorno viaja a 300 000 000 m/s, el ojo humano ve la luz simultáneamente con la formación del canal, pero el sonido del trueno toma varios segundos para llegar al oído del observador. Por ello es posible estimar en metros la distancia a que impactó un rayo, multiplicando la velocidad del sonido por el tiempo en segundos, que transcurre entre el relámpago y la llegada del trueno.

### ***3.6.2 Propagación***

Las señales acústicas generadas por relámpagos se propagan a grandes distancias a través de una atmósfera que es no homogénea, anisotrópica y turbulenta. De la revisión de los efectos de propagación sobre ondas de sonido en el aire, algunas de ellas corresponden a los truenos y aquí solo consideraremos brevemente las más sobresalientes:

Los tres efectos de propagación primaria de interés son: el cambio en la forma de la onda asociado con la amplitud finita de las ondas de sonido; la atenuación de la onda de sonido, y la refracción térmica. En principio todos estos fenómenos pueden ser considerados satisfactoriamente en una teoría general de propagación de truenos. La refracción es debida al viento de cizalla, esto es al cambio en la velocidad del viento con la altura, la cual no varía apreciablemente con el tiempo, puede también ser modelada si la velocidad del viento horizontal es conocida como una función de la altura. Existen otros factores que influyen la propagación como son: vientos transientes, aerosoles, turbulencia, y la reflexión de terrenos irregulares como las montañas.

# **CAPITULO IV**

---

---

## **ANTECEDENTES**

## 4.1 Introducción

La posibilidad de una conexión entre las tormentas eléctricas y una radiación penetrante fue primero sugerida por C. T. R. Wilson en 1925 [72], quien afirmó que los potentes campos eléctricos de las tormentas eléctricas ejercen un importante efecto de aceleración, sobre las partículas  $\beta$  producidas por la desintegración de material radioactivo que es acarreada por el aire. Además mostró que muchas de estas partículas al atravesar el campo eléctrico de una tormenta eléctrica obtienen más energía de la que pierden por ionización, y que estas adquieren una fracción muy considerable de la energía correspondiente a la caída de potencial, que es del orden de  $10^9$  volts, entre los polos de la nube.

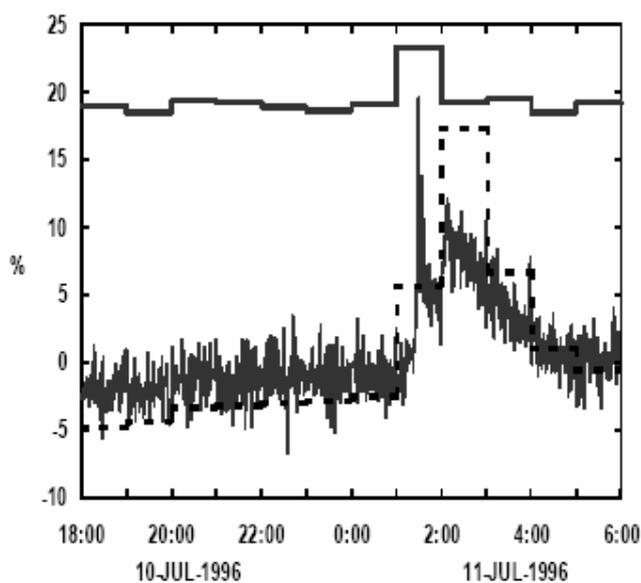
Además Wilson examinó el efecto de los encuentros cerrados de las partículas resultantes con electrones atómicos, lo cual dio como resultado, la eyección de partículas secundarias rápidas; y también la acción de dispersión nuclear ordinaria, comprobando que ninguno de estos podría interferir con el proceso de aceleración.

Wilson afirmaba que los electrones secundarios, como a menudo son emitidos con la suficiente energía y en una dirección conveniente para ser acelerados. Entonces un encuentro de vez en cuando con un núcleo atómico, a una distancia en que la ley inversa al cuadrado de la fuerza fallara, sería la única manera posible en que el proceso pudiera ser detenido, pero tal encuentro sería tan raro, debido a que antes de que esto ocurriera, la partícula habría adquirido una muy considerable cantidad de energía, que esta podría ser radiada como un rayo  $\gamma$  de gran poder penetrante. Por lo que el concluyo diciendo: “El efecto de una aceleración debida al campo eléctrico de una tormenta, es que la partícula en lugar de morir, como si se tratara de una muerte natural por la pérdida gradual de la energía, está adquirirá más y más energía, lo cual significa un aumento en sus posibilidades de sobrevivir todos los distintos accidentes o encuentros con núcleos atómicos”.

Por muchos años, este tema no tuvo un notable desarrollo, sino hasta 1985 y 1987, cuando Alexeenko y colaboradores presentaron en la 19ª y 20ª Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos (CIRC) [2,3], los resultados obtenidos de experimentos realizados en el Valle de Baksan en Rusia, empleando un detector de chubascos atmosféricos de rayos cósmicos y un medidor de campo eléctrico, obteniendo variaciones de corto período (8-16 minutos) en la intensidad de los rayos cósmicos, con una duración de 15 minutos a 2 horas y rara vez superior a 10 horas, teniendo una amplitud característica de  $\sim 1\%$  de la razón de conteo, la cual no podía ser explicada por variaciones de presión y temperatura. Por lo que la asociaron a fenómenos de precipitación de lluvia de nubes cumulonimbus y nimbostratus, así como a la presencia de campos eléctricos atmosféricos. Ya que cada vez que había variaciones de corto período en la intensidad de los rayos cósmicos, había lluvia o tormenta eléctrica. Disturbios en el campo eléctrico fueron registrados en todos los casos ( $\sim 20$  kV/m). De este trabajo se concluyo que: las perturbaciones de corta duración en la intensidad de los rayos cósmicos, eran un fenómeno bastante común. Estableciendo que su origen era meteorológico, debido a que estaba correlacionado con el campo eléctrico. Esta variación fue explicada, considerando que la fuerza del campo eléctrico, a gran altura es mucho mayor que el medido en la superficie.

## 4.2 Estudios Realizados con la Componente Electromagnética

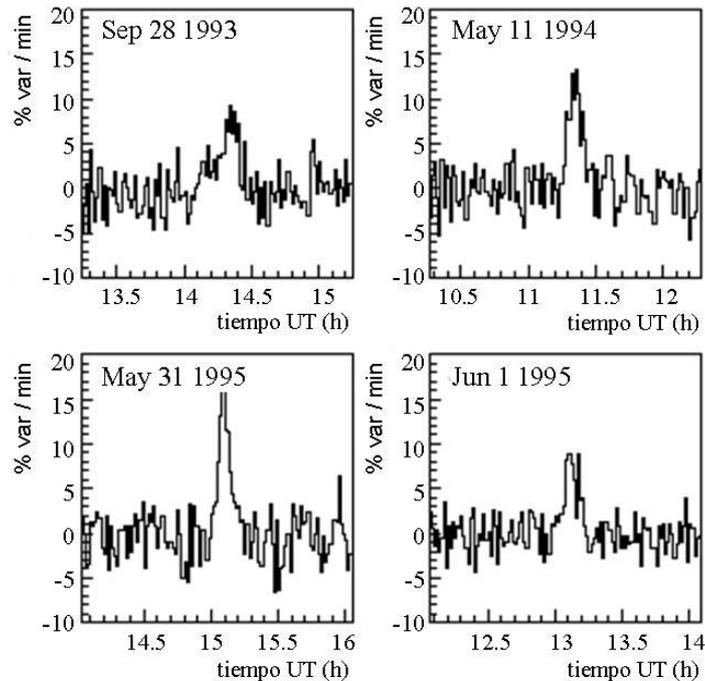
En 1999 Aglietta y colaboradores [1], encontraron que hay una componente de larga duración (de horas) y otra de corta duración (aproximadamente 10 minutos) como se muestra en la figura 4.1. Tales eventos tienen distintos orígenes. La de larga vida la asocian a la emisión de rayos  $\gamma$  de aerosoles radioactivos, los cuales son transportados a la superficie por la lluvia. Los rayos  $\gamma$  son principalmente producto del decaimiento de radón atmosférico. Los eventos de corta duración los atribuyen, a los intensos campos eléctricos actuando sobre los rayos cósmicos secundarios, los cuales aceleran electrones, produciendo una avalancha de electrones rápidos, debido a las colisiones con moléculas del aire, lo cual es conocido como proceso *runaway*.



**Figura 4.1:** Variación presentada en la componente EM, durante la tormenta eléctrica del 11 de julio de 1996. La línea con picos, es el porcentaje de incremento del conteo por minuto para una energía  $E > 0.4$  MeV; la línea punteada, es la tasa de conteo por hora, en el rango de energía 0.1-2.8 MeV; la línea continua de la parte superior de la gráfica, es la razón de conteo por hora en el rango de energía de 3-10 MeV (tomada de [1]).

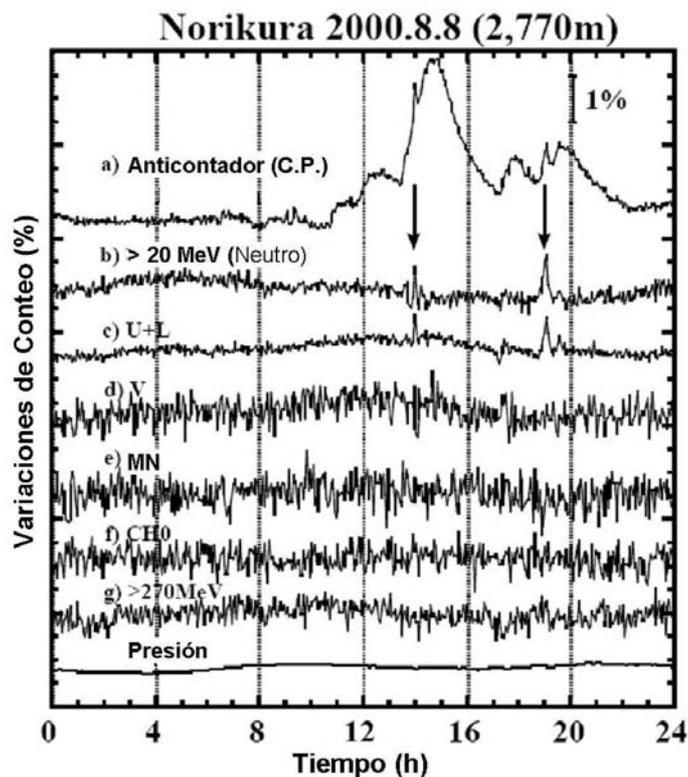
Vernetto presento en 2001 [70], un estudio de la variación de la razón de conteo de los detectores de chubascos de rayos cósmicos durante tormentas eléctricas; él encontró que hay un incremento en la razón de conteo de los detectores, usualmente cuando inicia la lluvia y permanece con una magnitud del orden de  $\sim 5$ -15% en un tiempo de  $\sim 0.5$ -1 hora; cuando la lluvia cesa, la tasa de conteo regresa a su valor normal en unas horas (ver figura 4.2). El incremento lo asocia, a las nubes de tormenta que pasan sobre los detectores, las

cuales tienen un intenso campo eléctrico perpendicular a la Tierra. El campo eléctrico de la nube amplifica el tamaño del chubasco de rayos cósmicos, de acuerdo al proceso *runaway*, produciendo un incremento en el número de chubascos detectados.



**Figura 4.2:** Porcentaje de variación por minuto de los detectores de chubascos de rayos cósmicos, para 4 eventos de tormenta eléctrica (tomada de [70]).

Takami y colaboradores presentaron en la 27a CIRC [65], los registros de la razón de conteo de los rayos cósmicos secundarios, detectados en el Monte Norikura (Japón) durante eventos de tormenta eléctrica del verano del 2000, ellos encontraron una variación de larga duración (algunas horas) en los contadores proporcionales (ver figura 4.3a), y una de corta duración (~10 minutos) en los detectores de centelleamiento, esta se muestra en la figura 4.3b y c. La primera variación la asocian a los rayos  $\gamma$  de baja energía, que son producto del radón, los cuales tienen una energía de 609 keV; y la variación de corta duración, la atribuyen a la aceleración de electrones secundarios, lo cual es debido a que la Tierra esta cargada positivamente y la fuerza del campo eléctrico puede ser de hasta 100 kV/m. De esta manera los electrones son acelerados produciendo fotones con una energía cercana a los 40 MeV por el proceso de *bremsstrahlung*. Ellos detectaron incrementos del 1% de la razón de conteo. La conclusión a la que llegaron, es que los electrones de baja energía, son acelerados por el campo eléctrico, lo cual introduce un nuevo efecto. Este es, que si los electrones son acelerados, los positrones serán desacelerados.

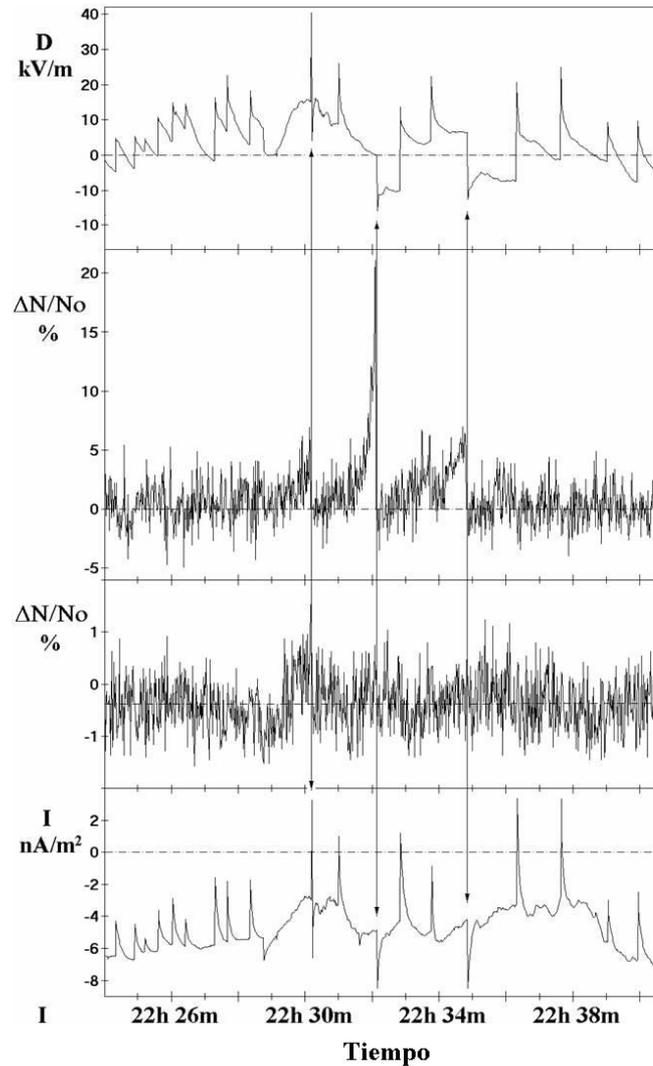


**Figura 4.3:** variaciones registradas el 8 de agosto de 2000 en el Monte Norikura. (a) contador proporcional de 64 m<sup>2</sup>, (b) contador de centelleamiento sin anticontadores de 64 m<sup>2</sup>, (c) contador de centelleamiento sin anticontadores de 36 m<sup>2</sup>, (d) el mismo detector pero para los canales de coincidencia, (e) el monitor de neutrones 10NM64, (f) detector de plástico centelleador de 1 m<sup>2</sup> x 50 cm, (g) el canal de E > 270 MeV del detector de 64 m<sup>2</sup>. La escala es indicada por la línea de barrido que indica 1%, en la parte superior derecha de la figura (tomada de [59]).

Alexeenko y colaboradores en 2001 y 2002 [4,5], estudiaron el efecto de las tormentas eléctricas sobre la componente electromagnética y muónica de los rayos cósmicos, la conclusión a la que llegaron, es que las variaciones del campo eléctrico durante períodos de tormenta eléctrica, es la principal causa de disturbios de corta duración en la intensidad de rayos cósmicos secundarios, lo cual confirmaron con observaciones, durante el verano del 2000. Ellos también reportaron variaciones de corta duración con variaciones muy grandes en la intensidad de la componente electromagnética (de hasta 20%), las cuales fueron observadas antes de una descarga eléctrica, ellos proponen que esta variación es una manifestación del mecanismo *runaway breakdown*<sup>1</sup>, por lo que las

<sup>1</sup> Runaway Breakdown es una teoría de la iniciación de una descarga propuesta por Alex Gurevich en 1992. Los electrones en el aire tienen un camino libre medio de ~1 cm. Mientras que los electrones que se mueven a una gran fracción de la velocidad de la luz tienen un camino libre medio de hasta 100 veces mayor. Debido a este gran camino libre, un campo eléctrico puede acelerar estos electrones a energías mucho más elevadas que la de los electrones estáticos. Si estos golpean moléculas de aire, más electrones relativistas se liberarán, creando una avalancha de multiplicación de electrones "fugitivos" (runaway), lo cual da inicio a la descarga.

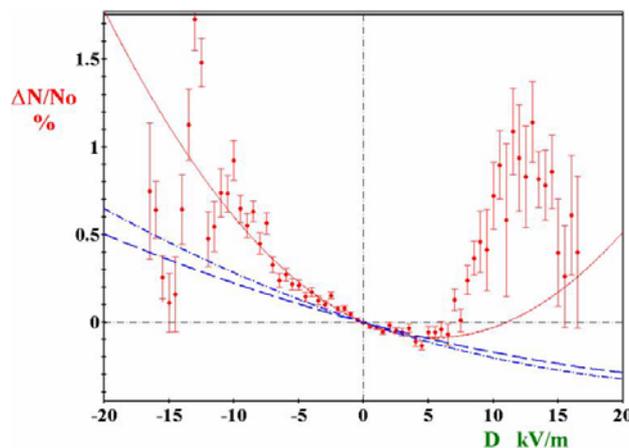
observaciones, son la confirmación experimental de la teoría de este mecanismo (ver figura 4.4). También mostraron el resultado de un análisis de regresión hecha a la componente electromagnética, obteniendo una correlación negativa y un término lineal dominante, el coeficiente de regresión lineal fue de 1% por 20 kV/m, lo cual es aproximadamente igual al valor experimental.



**Figura 4.4:** Variaciones presentadas durante la tormenta eléctrica del 7 de septiembre de 2000. El panel superior es el campo eléctrico, los cuales fueron corregidos empleando los datos de la corriente eléctrica de la lluvia (panel inferior), el segundo panel de arriba hacia abajo corresponde a la componente electromagnética, donde se muestra una variación del 20% en la razón de conteo y el tercer panel es la componente muónica de los rayos cósmicos secundarios, donde no se observó ningún efecto (tomada de [5]).

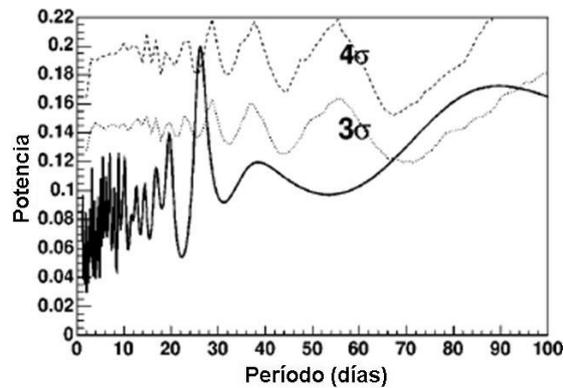
Lidvansky en [36], presento a manera de resumen que los efectos de las tormentas eléctricas sobre los rayos cósmicos, son principalmente: (1) grandes incrementos en las partículas de baja energía con una típica escala temporal de unas cuantas horas; (2) buenas correlaciones de las intensidades de la componente electromagnética y muónica con la intensidad de campo eléctrico; (3) significantes incrementos en la intensidad de la componente electromagnética antes de una descarga eléctrica, cuya característica probablemente depende de la polaridad de la descarga.

Khaerdinov y colaboradores en [29], realizaron un estudio de las correlaciones de la componente electromagnética de los rayos cósmicos (10-30 MeV) con el campo eléctrico de la atmósfera durante períodos de tormenta eléctrica, detectadas entre el 2000-2002. El resultado fue una curva (ver figura 4.5), cuya parte regular esta conectada con la aceleración de electrones, mientras que la distribución que se sale de la curva de lado derecho de la figura 4.5, se debe a la aceleración de positrones, aunque también puede deberse a la aceleración de electrones, en un nivel más alto de la nube, donde el campo eléctrico es más intenso y de signo opuesto, o inclusive a los rayos  $\gamma$  producidos por bremsstrahlung, los cuales contribuyen al conteo directamente.



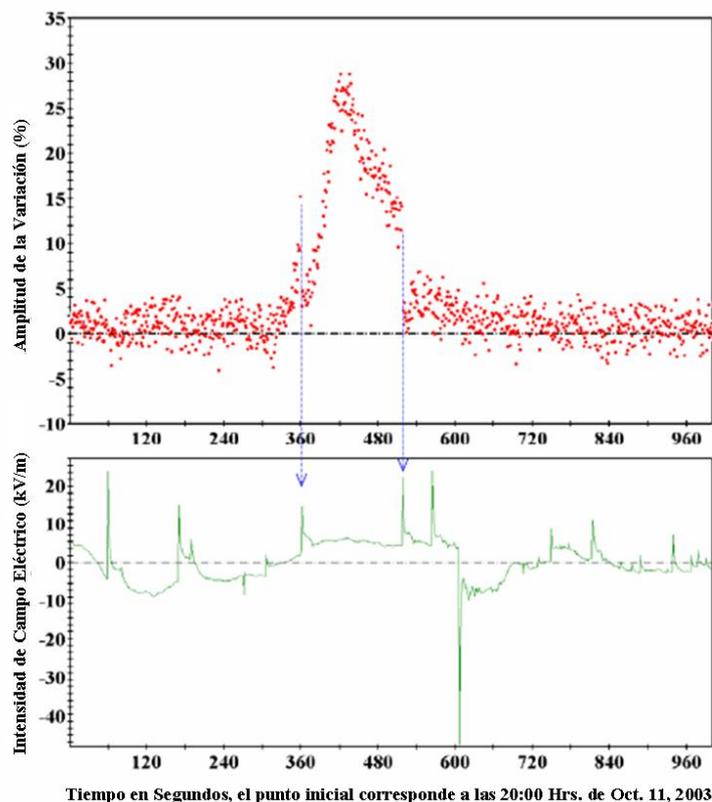
**Figura 4.5:** Curva de regresión de la intensidad de la componente electromagnética contra campo magnético. Los datos incluyen 52 tormentas eléctricas (tomada de [29]).

Muraki y colaboradores en [48,49], encontraron que la ocurrencia de fuertes disturbios en la intensidad de la componente electromagnética, es correlacionada con la presencia de tormentas eléctricas, lo cual es debido principalmente, a configuraciones de campo eléctrico negativo, aunque también encontraron evidencia de incrementos producidos en campos eléctricos positivos; además, hallaron que la ocurrencia de tormentas eléctricas, y los subsecuentes eventos de partículas tienen una periodicidad de 26 días, durante períodos de máxima actividad solar (consideraron datos de 1991-1992 y 1999-2001), y esta desaparece en períodos de mínimo solar (ver figura 4.6); lo cual consideran que es un tipo de modulación solar sobre la ocurrencia de tormentas eléctricas, o sobre el campo eléctrico asociado.



**Figura 4.6:** Análisis de máxima entropía realizado a las tormentas eléctricas registradas del 26 de octubre de 1990 al 15 de enero de 2002, la cual muestra la presencia de una periodicidad de 26 días (línea continua). Las líneas punteadas corresponden a las fluctuaciones esperadas para el ruido blanco en cada período, respectivamente (tomada de [49]).

Khaerdinov y colaboradores en 2005, presentaron nuevos resultados del estudio de las variaciones de la intensidad de la componente electromagnética de los rayos cósmicos ante la presencia de tormentas eléctricas. En [32] concluyen que la aceleración de electrones que fue precedida por Wilson existe, además de que la energía obtenida puede ser considerablemente alta (más de 10 MeV), y que esta no necesariamente es directamente relacionada con las descargas eléctricas. En [33] realizaron un estudio más detallado de esta fenomenología, analizando incrementos en la intensidad de la componente electromagnética de hasta 30% de la razón de conteo, para un rango de energía de 10 MeV a 30MeV. Khaerdinov y colaboradores proponen que los incrementos se deben a la presencia de un medio de retroalimentación, ellos consideran que la probabilidad de que dicho proceso ocurra es muy baja, sin embargo debido a que este crecimiento puede ser lo suficientemente lento, este puede explicar los datos experimentales. El perfil regular de estos disturbios, muestra un crecimiento exponencial hasta alcanzar la saturación natural (máximo incremento) y posteriormente un decaimiento exponencial (que es más lento que el incremento), el cual puede ser interrumpido por una descarga (ver figura 4.7); lo cual atribuyen que es debido, a que las descargas eléctricas causan una redistribución temporal del campo eléctrico, por lo que las condiciones del ciclo de retroalimentación es violado por un momento. Ellos consideran, que el ciclo de retroalimentación puede ser esencial y eventualmente el proceso principal de regulación del campo eléctrico en la atmósfera. Mediante una simulación del proceso, ellos encontraron que el campo eléctrico crítico para la existencia de partículas *runaway*, es substancialmente menor que para el proceso de retroalimentación. Argumentando que para que se de el *runaway*, se necesita un campo eléctrico de gran extensión para obtener un gran número de partículas. Las características de longitud del proceso de retroalimentación pueden ser un poco mayor, sin embargo esta longitud es suficiente para producir un incremento exponencial de la intensidad de las partículas generadas. De este modo, en un determinado volumen este proceso puede ser dominante.



**Figura 4.7:** Un gran disturbio detectado durante una tormenta eléctrica el 11 de octubre de 2003. Una descarga eléctrica detiene el incremento exponencial, y otra termina el decaimiento lento de la intensidad (tomada de [33]).

### ***4.3 Estudios Realizados con la Componente Nucleónica***

Dorman y colaboradores en [17], calcularon los valores estimados para las variaciones del campo eléctrico, y los resultados implican un cambio en la razón de conteo del monitor de neutrones de aproximadamente 0.27 - 0.81 %, debido al efecto del campo eléctrico atmosférico generado por una tormenta eléctrica, basados en la teoría general de las variaciones meteorológicas de los rayos cósmicos [15].

Trabajando con datos de muones suaves a nivel del mar y tomando en cuenta que los muones suaves dan una razón de conteo del 7% en un monitor de neutrones, Dorman, y colaboradores [18], obtuvieron un efecto del campo eléctrico de alrededor de 0.35 %, para valores del campo eléctrico entre 10 y 20 kV/m.

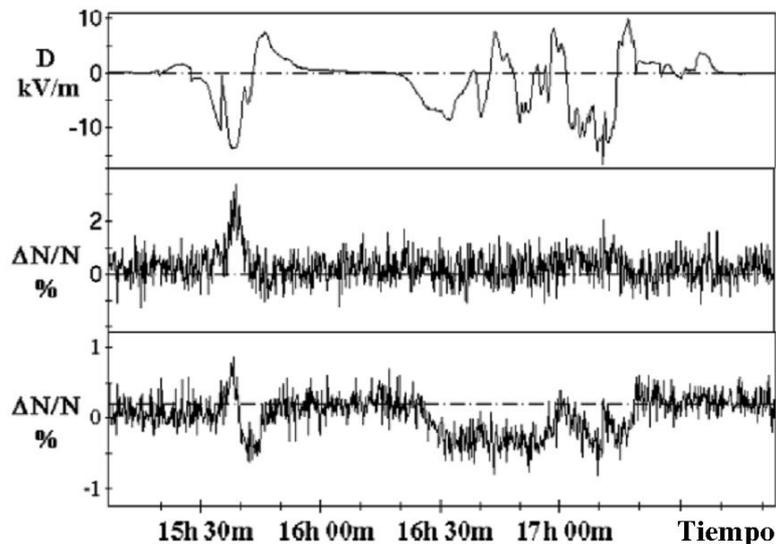
Muraki y colaboradores en [48, 49], encontraron evidencia, de la aceleración de protones en la presencia de campos eléctricos positivos.

En 2006 González y Valdés-Galicia [21], estudiaron los posibles efectos de los campos eléctricos de las tormentas eléctricas en la componente nucleónica de los rayos cósmicos secundarios medidos en la ciudad de México. Encontrando una variación en la intensidad de cerca de 0.2%.

#### 4.4 Estudios Realizados con la Componente Muónica

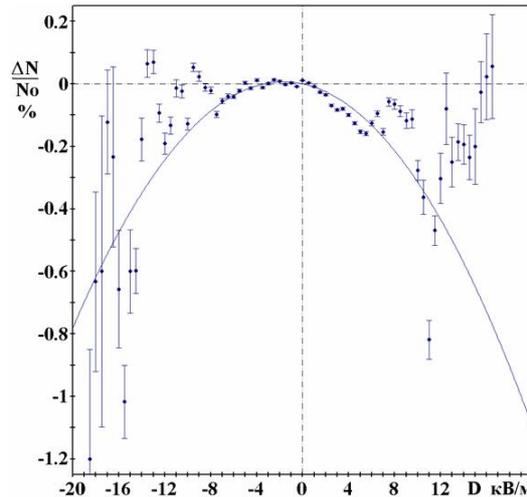
Takami y colaboradores en la 27a CIRC [59], menciona que los muones de baja energía, son acelerados por el campo eléctrico, lo cual introduce un nuevo efecto. Que consiste en que, si los muones negativos son acelerados, muones positivos son desacelerados.

Alekseenko y colaboradores en 2001 y 2002 [4,5], demostraron mediante un análisis de regresión realizado a la componente muónica, que este tenía un efecto cuadrático dominante, por lo que el incremento del campo eléctrico de cualquier signo, provoca un decremento en la intensidad de muones. Lo cual atribuyen, a que el número de muones positivos y negativos son cercanamente iguales (haciendo despreciable el pequeño exceso de muones positivos). También consideran que, en el campo eléctrico los muones de un signo son acelerados, mientras que muones de signo opuesto son desacelerados. El aumento de estos últimos decae como resultado de la disminución de la intensidad total.



**Figura 4.8:** Intensidad de campo eléctrico cercano a la superficie (panel superior) durante un período de tormenta eléctrica de Sept. 24, 2000, detectada en el Valle de Baksan, al norte del Cáucaso. La componente Electromagnética (panel medio) y Muónica (panel inferior) de los rayos cósmicos secundarios están correlacionado con el campo eléctrico. Promediados a intervalos de 10 segundos (tomada de [5]).

Khaerdinov y colaboradores en [30], estudiaron la correlación de la componente muónica de los rayos cósmicos con el campo eléctrico atmosférico, durante tormentas eléctricas detectadas entre 2000-2002. El resultado al que llegaron, es que hay un efecto cuadrático que cambia la intensidad de muones, ante la presencia de un campo eléctrico de cualquier signo, y este es más notorio en muones de baja energía ( $< 1$  GeV), esto se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9:** La variación en la intensidad de muones con energías cercanas a 1 GeV contra el campo eléctrico cercano a la superficie. Los datos incluyen 60 tormentas eléctricas (tomada de [30]).

En 2005 Khaerdinov y Lidvansky [31], demostraron que ambos efectos, lineal y cuadrático están presentes en la intensidad de la componente muónica, como una función del campo eléctrico cercano a la superficie y de la diferencia de potencial, entre el nivel de tierra y las altitudes de producción de muones. Dando como resultado un efecto predominantemente negativo (decremento en la intensidad) y su amplitud se incrementa con el decremento del umbral de energía de los muones, de acuerdo con los datos experimentales de Baksan.

# **CAPITULO V**

---

---

## **ESTUDIOS DE CASOS**

## **5.1 Introducción**

En este capítulo se presenta, el estudio realizado para la componente electromagnética y muónica de los rayos cósmicos secundarios ante la presencia de las tormentas eléctricas. Es por esta razón que en el capítulo I, se dio una revisión de las variaciones que se presentan en los rayos cósmicos, lo cual es la base para las correcciones que se realiza en la intensidad de los mismos, se realizaron todas las correcciones a ambas componentes, excepto la debida a la electricidad atmosférica, debido a que es de gran interés en el presente trabajo. Los datos de rayos cósmicos se obtuvieron de un telescopio de muones, de donde se extrae la componente dura y blanda de los rayos cósmicos, es por esto, que se le dedico un capítulo completo al detector. Por otro lado, como se va a analizar el efecto de las tormentas eléctricas sobre los rayos cósmicos, en el capítulo III, se describe como se da el efecto de formación y electrificación de esta, para justificar el hecho de que en estas se generan potentes campos eléctricos, que afectan a la intensidad de los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre, tal y como se muestra en el capítulo IV. Con todo esto en mente, se procede a explicar el estudio realizado, detallando la fuente de obtención de los datos, la selección y la corrección de los datos, así como la metodología empleada en el análisis, y finalmente la discusión de los resultados.

## **5.2 Obtención de los Datos**

Las razones de conteo de la componente muónica fueron obtenidas de las coincidencias de los centelladores superior e inferior del telescopio de muones, que esta ubicado en Ciudad Universitaria (UNAM). El cual registra datos cada 5 minutos, los datos empleados son de la dirección vertical, correspondiente al año 2004.

Los datos de intensidad de la componente electromagnética (EM), se obtienen considerando el conteo de los centelladores superiores, los cuales cuenta todos los rayos cósmicos secundarios (esto es: componente EM, muónica y nucleónica [protones]), a estos se les resta el conteo de muones, quedando de esta manera las componentes nucleónica y EM, y debido a que el número de electrones es muchísimo mayor que el de protones, el conteo resultante proporciona una muy buena aproximación de la componente EM. La geometría del telescopio, puede ser consultada en la figura 2.4 del capítulo II.

Los datos de tormentas eléctricas fueron obtenidos de los reportes proporcionados por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. La estación meteorológica está ubicada a menos de 10 km, de donde se encuentra localizado el telescopio de muones. Estos reportes indican la hora de inicio de la tormenta, los tipos de nubes que había, la temperatura y la presión reducida al nivel medio del mar, así como la dirección de los vientos y su velocidad. Se tomaron datos del año 2004, en estos reportes se encontraron 107 tormentas eléctricas.

### **5.3 Corrección y Selección de los Datos**

Debido a que la intensidad de los rayos cósmicos secundarios, se ve afectado por variaciones debidas al campo geomagnético, al espectro de los rayos cósmicos primarios y a variaciones atmosféricas; se tomaron las siguientes medidas: se consideró un período de mínimo solar, debido a que existen menos perturbaciones en el medio interplanetario, así como días geomagnéticamente quietos, y días en los cuales no ocurrieron decrementos Forbush. Para finalmente, realizar las correcciones atmosféricas en los datos resultantes.

Para la graficación de los datos, las correcciones, el filtrado, la prueba estadística, y el análisis de tiempo-frecuencia, se empleo el software de análisis matemático: MATLAB, debido a la facilidad de programación.

#### ***5.3.1 Eliminación de Variaciones Geomagnéticas***

Primero se eliminaron las variaciones del campo geomagnético, para esto se emplearon días en los cuales la suma del índice geomagnético  $K_p$  fue menor a 20, los cuales son días geomagnéticamente quietos. El índice  $K_p$  es el índice de actividad magnética global, el cual es medido cada 3 horas. Este es resultado del promedio aritmético de 13 estaciones, que se encuentran ubicadas entre  $43^\circ$  y  $63^\circ$  de latitud geomagnética norte y sur. Estos índices fueron proporcionados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del NOAA [III].

#### ***5.3.2 Eliminación de Variaciones en el Espectro Primario***

Para descartar la presencia de variaciones en el espectro primario, se graficaron todos los datos del telescopio de muones correspondientes al 2004, buscando decrementos Forbush (dF), el cual es un fenómeno global que aparece al mismo tiempo en todas las latitudes y longitudes, dicho fenómeno en unas cuantas horas produce disminuciones en la intensidad de los rayos cósmicos de 5 hasta 30% de la razón de conteo, y debido a que su recuperación es lenta, la cual puede tarda hasta varios días, cuando fueron identificados se quitaron del análisis junto con los días que tardo la recuperación, quedando de esta manera solo datos con variaciones atmosféricas.

#### ***5.3.3 Correcciones por Efectos Atmosféricos***

Los datos se corrigieron por las variaciones atmosféricas debidas a temperatura y presión únicamente (ver tablas 4.1 y 4.2. Los efectos debidos a la velocidad del viento y a la humedad se estimaron despreciables en la Ciudad de México.

Para calcular las variaciones debidas a fenómenos atmosféricos en los rayos cósmicos secundarios, Dorman [14] describe los cambios en la intensidad de la radiación cósmica, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta I}{I} = \beta_P \delta P + \beta_T \delta T \quad (5.1)$$

donde  $\beta_P$  y  $\beta_T$  se denominan coeficiente de presión y temperatura respectivamente;  $\delta P$  y  $\delta T$  corresponden a las variaciones de presión y temperatura.

Los coeficientes atmosféricos pueden ser encontrados, empleando el método de regresión lineal entre la intensidad de los rayos cósmicos y la variable de interés (presión o temperatura).

Sustituyendo los valores de presión o temperatura como variable dependiente y considerando a la intensidad de radiación cósmica como variable independiente en (5.1), se obtienen los respectivos coeficientes (ver tablas 5.1 y 5.2).

<b>Mes</b>	<b>Máxima Intensidad</b>	<b>Coeficiente de Temperatura</b>	<b>Coeficiente de Presión</b>
<i>Enero</i>	266 800	0.05945	-0.32393
<i>Febrero</i>	268 700	0.10399	-0.37599
<i>Marzo</i>	265 800	0.06649	-0.32433
<i>Abril</i>	266 100	0.08366	-0.40151
<i>Mayo</i>	271 600	0.20586	-0.60241
<i>Junio</i>	271 100	0.11231	-0.33185
<i>Julio</i>	267 400	0.07525	-0.25328
<i>Agosto</i>	269 000	0.06449	-0.47542
<i>Septiembre</i>	269 800	0.12893	-0.49288
<i>Octubre</i>	271 600	0.10847	-0.37181
<i>Noviembre</i>	<b>272 500</b>	0.14265	-0.49839
<i>Diciembre</i>	269 100	0.11506	-0.45013
<b>Promedio</b>	<b>269 125</b>	<b>0.10555</b>	<b>-0.40849</b>

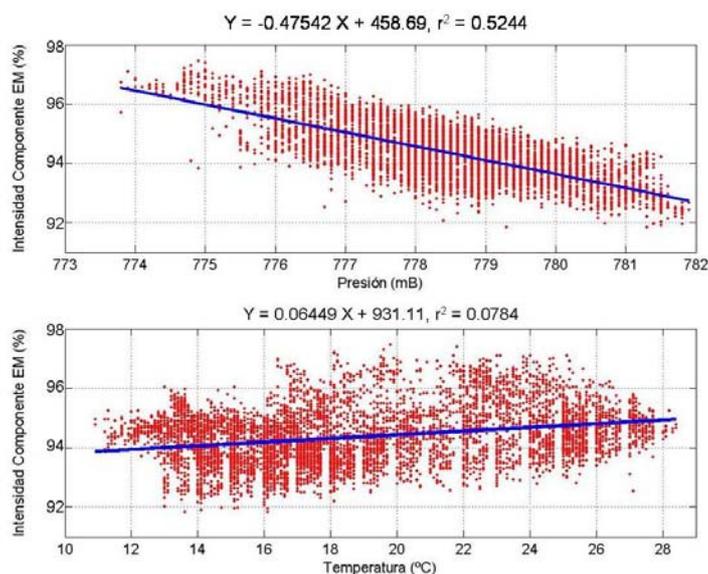
**Tabla 5.1:** Coeficientes atmosféricos de la componente Electromagnética.

En las tablas 5.1 y 5.2 se muestra la intensidad máxima detectada, así como el valor del coeficiente de temperatura y de presión por mes, y finalmente el valor promedio. El valor en negrita de la intensidad máxima es el valor empleado para normalizar y representar en % la intensidad de la radiación cósmica de la componente electromagnética (EM) y muónica.

Mes	Máxima Intensidad	Coficiente de Temperatura	Coficiente de Presión
Enero	110 900	0.00422	-0.48120
Febrero	<b>113 200</b>	0.05247	-0.21536
Marzo	112 600	0.01760	-0.11279
Abril	112 200	0.03750	-0.15000
Mayo	112 200	0.02988	-0.07190
Junio	112 300	0.05805	-0.14323
Julio	112 000	0.03719	-0.05091
Agosto	112 500	0.03029	-0.14487
Septiembre	112 500	0.06034	-0.23204
Octubre	112 300	0.04832	-0.07623
Noviembre	110 900	0.08449	-0.22257
Diciembre	113 000	0.01045	-0.14898
Promedio	112 217	0.03749270	-0.17084

**Tabla 5.2:** Coeficientes atmosféricos de la componente Muónica.

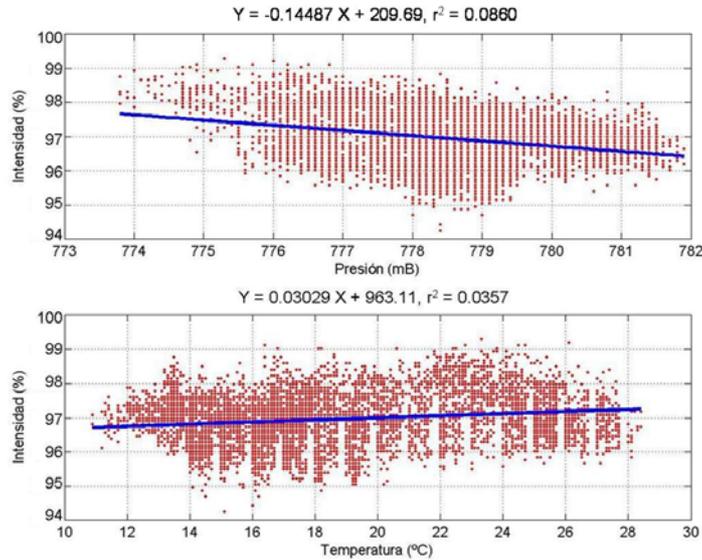
En las figuras 5.1 y 5.2 se muestran, a manera de ejemplo, diagramas de dispersión intensidad vs. Presión e intensidad vs. Temperatura y las rectas de regresión ajustadas para las componentes EM y muónica, correspondientes al mes de agosto de 2004. El mismo procedimiento se repitió para los otros 11 meses.



**Figura 5.1:** Recta de ajuste de la correlación de la componente EM con la presión (arriba) y la temperatura (abajo) para el mes de Agosto de 2004.

En las figuras 5.1 y 5.2 se muestra claramente una tendencia negativa entre la correlación de la intensidad de rayos cósmicos y la presión, esta se presenta en todo el 2004 en ambas componentes; mientras que la correlación con la temperatura muestra una

tendencia positiva, la cual se repite para todo el 2004 en ambas componentes (Ver tablas 5.1 y 5.2).



**Figura 5.2:** Recta de ajuste de la correlación de muones con la presión (arriba) y la temperatura (abajo) para el mes de Agosto de 2004.

En las tablas 5.1 y 5.2 se aprecia que el coeficiente de presión es negativo, mientras que el de temperatura es positivo. El signo negativo del coeficiente de presión, es debido a que el efecto de absorción es negativo, ya que cuando se incrementa la presión, la densidad del aire se incrementa y esto provoca que las partículas de rayos cósmicos secundarios tengan que atravesar una mayor cantidad de masa, provocando que muchas partículas desaparezcan, teniendo una reducción en la tasa de conteo de la intensidad de rayos cósmicos secundarios. Mientras que la temperatura tiene un efecto positivo, ya que si la temperatura se incrementa, provoca la expansión de la atmósfera, lo cual ocasiona que la densidad de partículas disminuya, y esto provoca un aumento en la tasa de conteo de la intensidad de los rayos cósmicos secundarios.

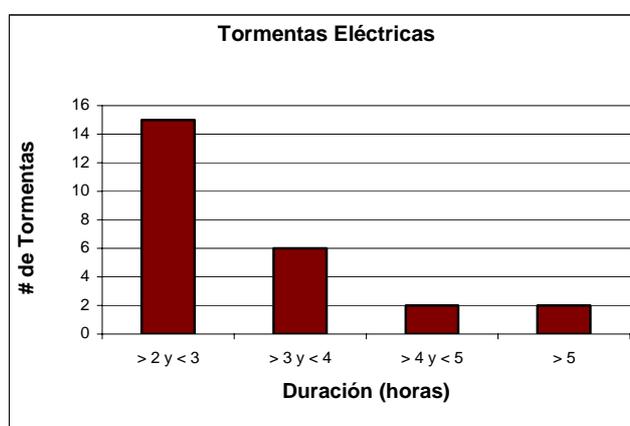
Una vez encontrados los coeficientes de presión ( $\beta_P$ ) y temperatura ( $\beta_T$ ), se tomó el valor promedio de cada uno. Y se realizó la corrección a los datos de rayos cósmicos empleando la siguiente ecuación [15]:

$$I = I_0 e^{-[\beta_P(\Delta P) + \beta_T(\Delta T)]} \quad (5.2)$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia entre el valor de la presión del dato de la máxima intensidad y el dato correspondiente, de igual forma  $\Delta T$ .  $I_0$  es el dato de la intensidad de la radiación cósmica en tanto por ciento, a corregir.

### 5.3.4 Elección de las Tormentas Eléctricas

Analizando los reportes de tormentas eléctricas correspondientes al 2004, se encontraron 99 tormentas eléctricas, de estas fueron eliminadas del análisis todas aquellas que ocurrieron en días perturbados magnéticamente o con dFs quedando solamente 88 eventos que corresponden a días quietos, de estas se seleccionaron solo 25 (ver apéndice 1), las cuales tuvieron una duración mayor de dos horas (ver figura 5.3), esto fue por cuestiones estadísticas, ya que de esta manera se tiene un mínimo de 24 datos por evento. Es importante hacer mención, que aquí se consideraron tormentas eléctricas multicelda y supercelda, debido a que son las de mayor duración.



**Figura 5.3:** Tormentas Eléctricas con una duración mayor a dos horas.

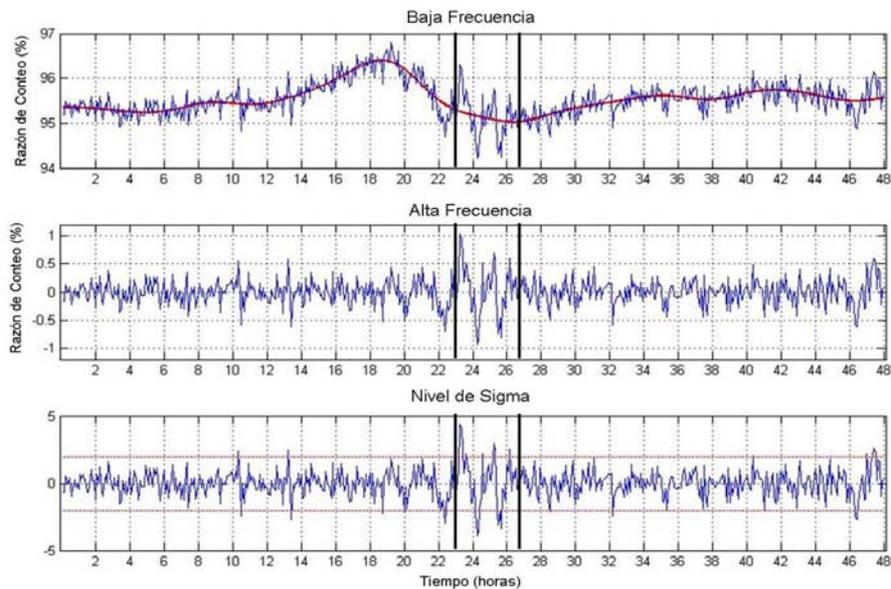
## 5.4 Metodología Utilizada

Antes de iniciar los análisis, se graficaron los datos de intensidad de rayos cósmicos de las componentes EM y muónica, de los días en que hubo tormenta eléctrica (TE). Donde se observó, la existencia de una tendencia en los datos, la cual es debida a la variación diurna; además de variaciones probablemente debidas a la tormenta, las cuales son de corto período, para lo cual se realizó un filtrado, para estudiar únicamente las variaciones de corta duración (altas frecuencias). Con la finalidad de tener un parámetro de comparación se seleccionaron 25 días quietos (ver apéndice 1), los cuales no tenían variaciones geomagnéticas, ni en el espectro primario (dFs), además de que no había presencia de nubes cumulonimbus, las cuales llegan a tener grandes campos eléctricos. Los días quietos (DQ) fueron también filtrados, también se realizó una prueba estadística, para ver si las TE y los DQ tenían una distribución semejante, y finalmente se realizó una análisis de tiempo-frecuencia, para ver las periodicidades de cada conjunto de datos.

### 5.4.1 Filtrado

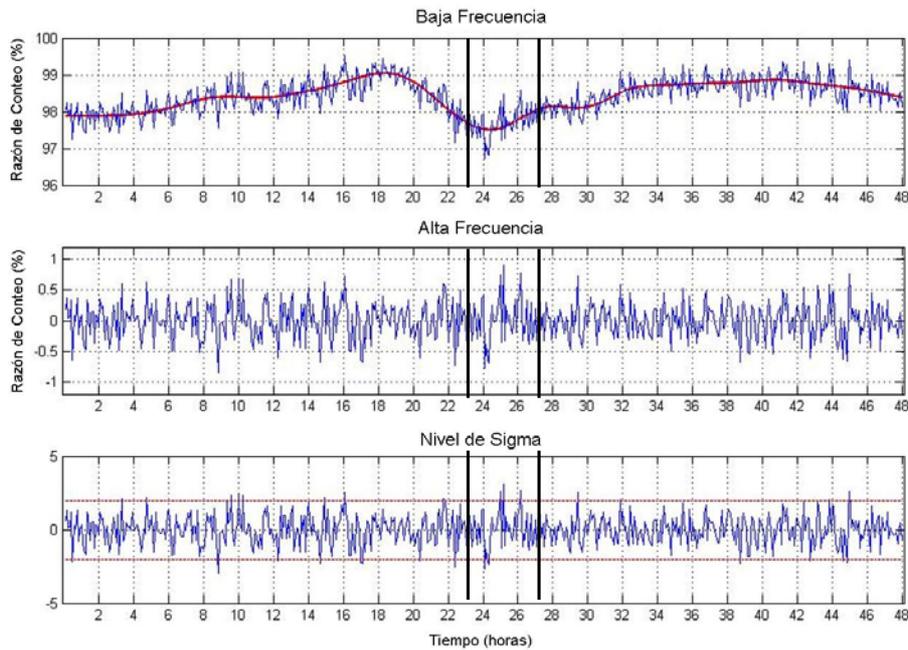
Todos los datos de intensidad de rayos cósmicos, presentaron una variación diurna, en algunos casos también semidiurna. Con el objeto de aislar los efectos debidos a tormentas eléctricas se decidió realizar un filtrado pasa altas en los datos de rayos cósmicos secundarios, para eliminar la tendencia de los datos (apéndice 2).

Mediante el uso de medias móviles de 5 datos, se calculo la tendencia de los datos, la cual representa las bajas frecuencias. Dado que los datos están compuestos por las bajas y las altas frecuencias, restamos a los datos de rayos cósmicos secundarios las bajas frecuencias, obteniendo de esta manera las altas frecuencias. El proceso de filtrado para la componente EM y muónica se muestra en las figuras 5.4 y 5.5. En donde se tomaron en promedio 20 horas de datos alrededor de la tormenta.



**Figura 5.4:** Proceso de filtrado de la componente EM para la tormenta eléctrica del 26-27 de Abril de 2004. En el panel superior se muestran los datos originales de la componente EM (línea con variaciones), la tendencia de los datos es la línea central suavizada. El panel de en medio es la componente de alta frecuencia; y en el panel inferior se muestran las variaciones de la alta frecuencia, normalizada con  $\sigma$ . El nivel de  $2\sigma$  se muestra en rojo, las líneas negras centrales limitan el período de tormenta.

El filtrado se realizo en los 25 eventos de tormentas eléctricas, y en 25 días elegidos como días quietos.



**Figura 5.5:** Proceso de filtrado para la componente muónica. Descripción similar a la figura 5.4.

#### **5.4.1.1 Identificación de la Tormenta Eléctrica**

Una vez realizado el filtrado pasa altas, en la señal resultante se identificaron las TE, esto es observando los paneles medio e inferior de las gráficas del filtrado, localizando las máximas fluctuaciones y comparando con los horarios reportados en los que ocurrió TE. Por ejemplo en las figuras 5.4 (EM) y 5.5 (muones), se muestra un incremento en las variaciones en el intervalo de 22-26 horas, durante la tormenta del 26 de abril de 2004, cuya duración fue de 23:45 PM a 03:00 AM del 27 de abril de 2004, esto es, de 23:45 a 27:00 horas en la gráfica.

#### **5.4.2 Prueba Kolmogorov-Smirnov**

Esta prueba se realizó con el fin de comparar las distribuciones de datos durante TE y durante DQ, por lo que, el resultado indicará si tienen igual distribución, o si son de diferentes distribuciones.

##### **5.4.2.1 Generalidades del Método**

La prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras [62], es una prueba estadística no paramétrica, que se emplea para comprobar si dos muestras de datos independientes se han extraído de la misma población (o de dos poblaciones con la misma distribución). Esta prueba estadística evalúa las distribuciones acumulativas de ambas muestras, de tal manera que si las dos muestras han sido extraídas de la misma distribución poblacional, entonces

las distribuciones acumulativas de ambas muestras serán sumamente cercanas, así como las diferencias de las distribuciones acumulativas sólo van a mostrar desviaciones al azar de la distribución poblacional. En el caso que las distribuciones acumulativas de las dos muestras sean diferentes, y estén demasiado alejadas una de otra en cualquier punto, esto significa que las muestras provienen de poblaciones distintas (Ver apéndice 3).

En esta prueba se emplearon las mismas 25 TE, considerando a cada una como una muestra, para ser comparados con 25 muestras de la misma duración durante DQ, recorriendo todo el DQ con incrementos del tamaño de la TE, posteriormente se tomó otro DQ y se realizó el mismo proceso, hasta completar los 25 DQ, este proceso se repitió para cada tormenta. El nivel de significancia se empleó al 68%.

### ***5.4.3 Análisis de Tiempo-Frecuencia***

Se inicia esta sección con una justificación del porque, se empleó el método de ondeletas (wavelet) como herramienta de análisis espectral; posteriormente se presentan los análisis de tiempo-frecuencia de los alrededores de la TE, de DQ y durante la TE.

#### ***5.4.3.1 Generalidades del Método de Ondeletas***

El análisis espectral fue realizado con el método de ondeletas [66], debido a que los datos que se analizan no son estacionarios y además este método proporciona un análisis de potencia en frecuencia y tiempo. Debido a la primera afirmación no se puede emplear la transformada de Fourier; sin embargo, se puede emplear la transformada de Fourier por ventana, donde se divide la señal en pequeños segmentos que pueden ser considerados estacionarios, la limitante es que la anchura de la ventana será igual en todo el intervalo de tiempo, de esta manera, una ventana estrecha proporciona buena resolución en el tiempo y pobre resolución en el dominio de la frecuencia, mientras que una ventana ancha tiene buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre resolución en el dominio del tiempo.

El problema de la transformada de Fourier por ventana radica en la elección adecuada de la función ventana, que es única para todo el análisis. Y esta depende de la señal a analizar, por ejemplo: si las frecuencias de la señal están bien separadas entre sí, se puede sacrificar resolución en frecuencia y preferir una buena resolución temporal. De lo contrario si la señal no presenta ésta característica, la elección de una buena ventana se complica.

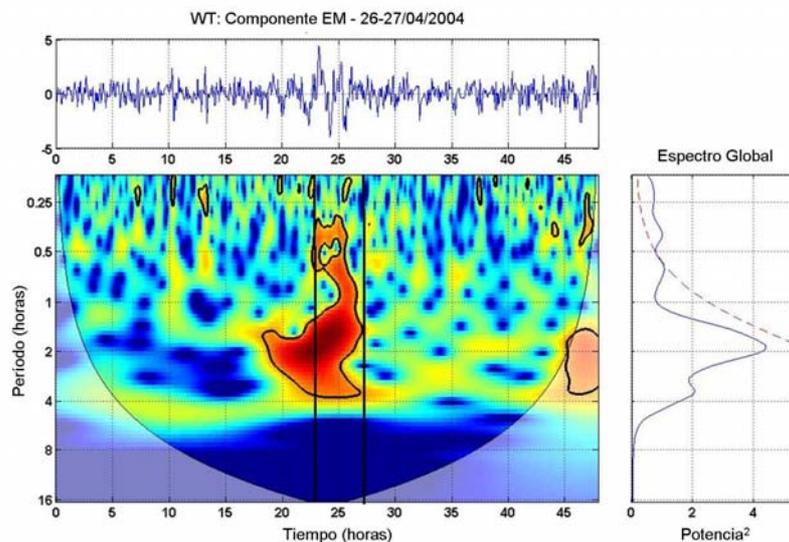
La problemática de la resolución tiempo-frecuencia, podría compararse al principio de incertidumbre de Heisenberg, debido a que no se puede tener buena resolución en tiempo y frecuencia al mismo tiempo. Sin embargo, es posible analizar cualquier señal empleando una técnica alternativa llamada análisis de multiresolución, este consiste en analizar la señal para diferentes frecuencias con diferentes resoluciones. Este análisis es el que emplea la transformada de ondeletas.

El análisis de ondeletas está diseñado para proporcionar una buena resolución temporal y pobre resolución en frecuencia para las altas frecuencias y buena resolución en frecuencia y baja en tiempo para las frecuencias bajas. Este tratamiento es idóneo para analizar los datos de rayos cósmicos, debido a que se tienen componentes de alta frecuencia de corta duración y componentes de baja frecuencia de larga duración. En la realización del análisis espectral se empleó como función madre de la ondeleta, la función de Morlet, que consiste de una onda plana modulada por una gaussiana, se empleó esta porque es la que tiene mejor calidad de escala, proporcionando una resolución fina en tiempo para las altas frecuencias y en frecuencia para las frecuencia bajas [66].

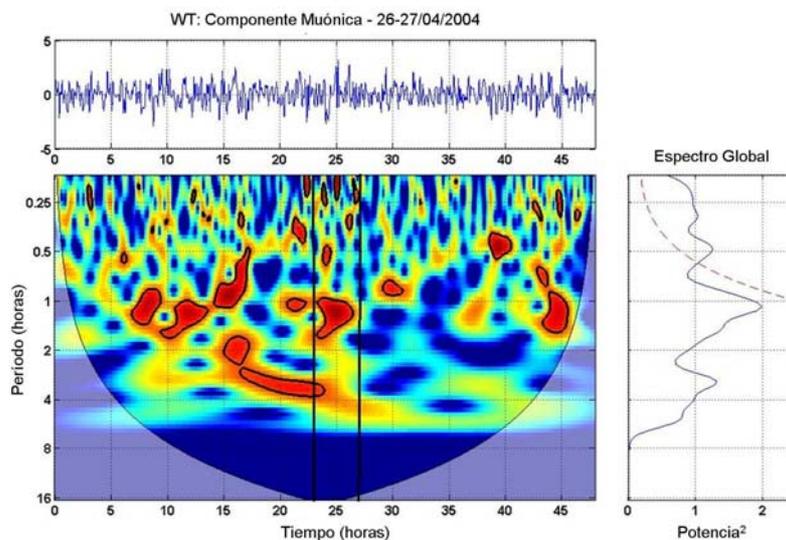
### 5.4.3.2 Alrededores de la Tormenta

El primer análisis de tiempo-frecuencia realizado fue alrededor de la TE, para esto se tomó la serie de datos resultante del filtrado de los 25 eventos seleccionados, tomando cada evento individual y normalizando los datos con  $1/\sigma^2$ .

De este análisis se obtuvieron los siguientes resultados: 44% de los eventos tenían un importante incremento en las variaciones durante la tormenta (ejemplo en la figura 5.6) y el 56% tenían variaciones antes, después y durante la tormenta, en el caso de la componente EM; mientras que para la componente muónica el 100% de los eventos varía antes, después y durante la tormenta eléctrica (ejemplo en la figura 5.7).



**Figura 5.6:** Variaciones de corta y larga duración. En el espectro de la componente EM del 26-27 de abril de 2004. El panel superior muestra la razón de conteo (%) de los rayos cósmicos en unidades de la desviación estándar. El período de la TE está limitado por las líneas verticales, todo lo que está dentro del cono de influencia tiene un nivel del 95% de confianza. A la derecha se encuentra el espectro global (Potencia vs período), la línea punteada es el nivel de ruido rojo (para mayor información ver apéndice 4).



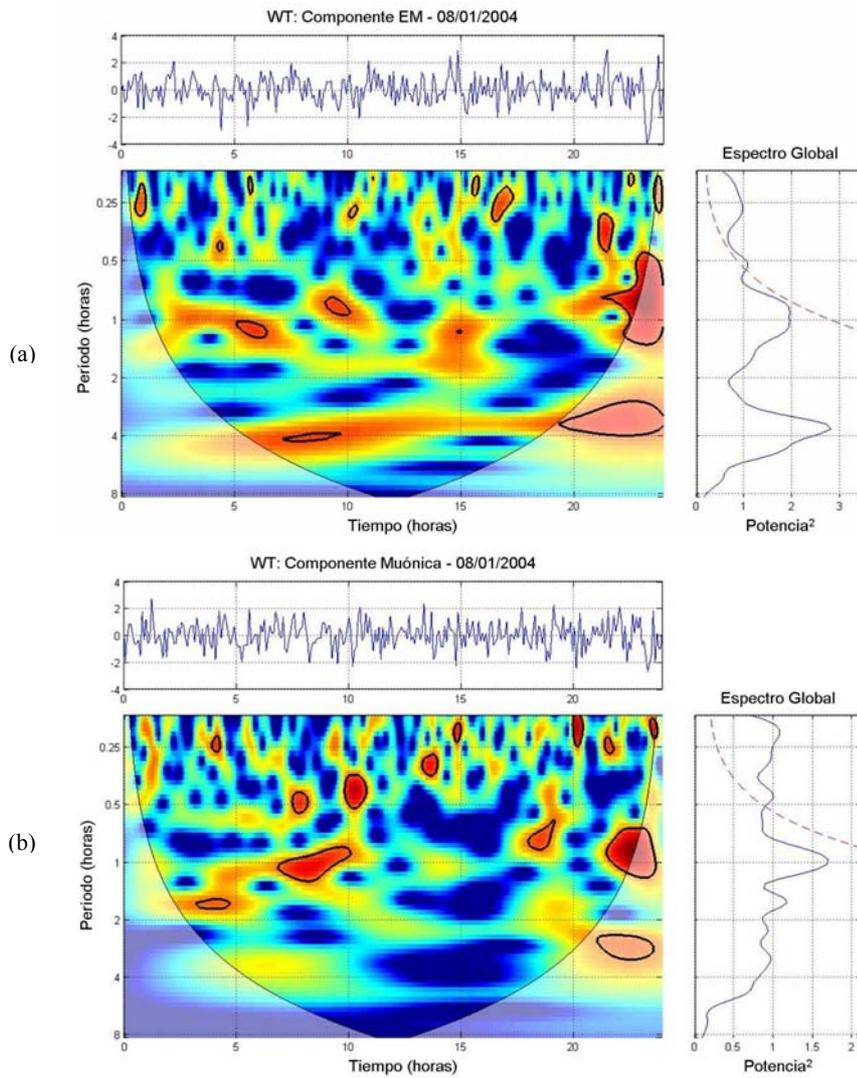
**Figura 5.7:** Variaciones de corta y larga duración. En el espectro de la componente muónica del 26-27 de abril de 2004. Descripción similar a la figura 5.7.

El análisis mostró frecuentemente la existencia de dos variaciones en ambas componentes: una de período corto (10-50 minutos) y otra de período largo (2-5 horas), como se muestra en la figura 5.6 y 5.7. La primera variación es producto de las TE [1,3], mientras la segunda posiblemente es debida a la humedad presente en la atmósfera producto de la lluvia y de la presencia de nubes [3]. La primera variación aparece en todos los eventos analizados en ambas componentes, mientras que la variación de baja frecuencia solo es encontrada en algunos eventos (80% en la componente EM y 52% en los muónica).

#### 5.4.3.3 Días Quietos

En este segundo análisis de tiempo-frecuencia se tomaron las componentes de alta frecuencia de las 25 series de datos de días quietos. El resultado típico de este análisis, se muestra en la figura 5.8. En el resultado del análisis de estos datos durante TE se puede observar la presencia de variaciones de corto y largo período, sin embargo, estas no pueden ser atribuidas a fenómenos atmosféricos, debido a que los datos ya fueron corregidos por presión, temperatura, y están libres de toda perturbación como tormentas aisladas, lluvia y presencia de nubes cumulonimbus.

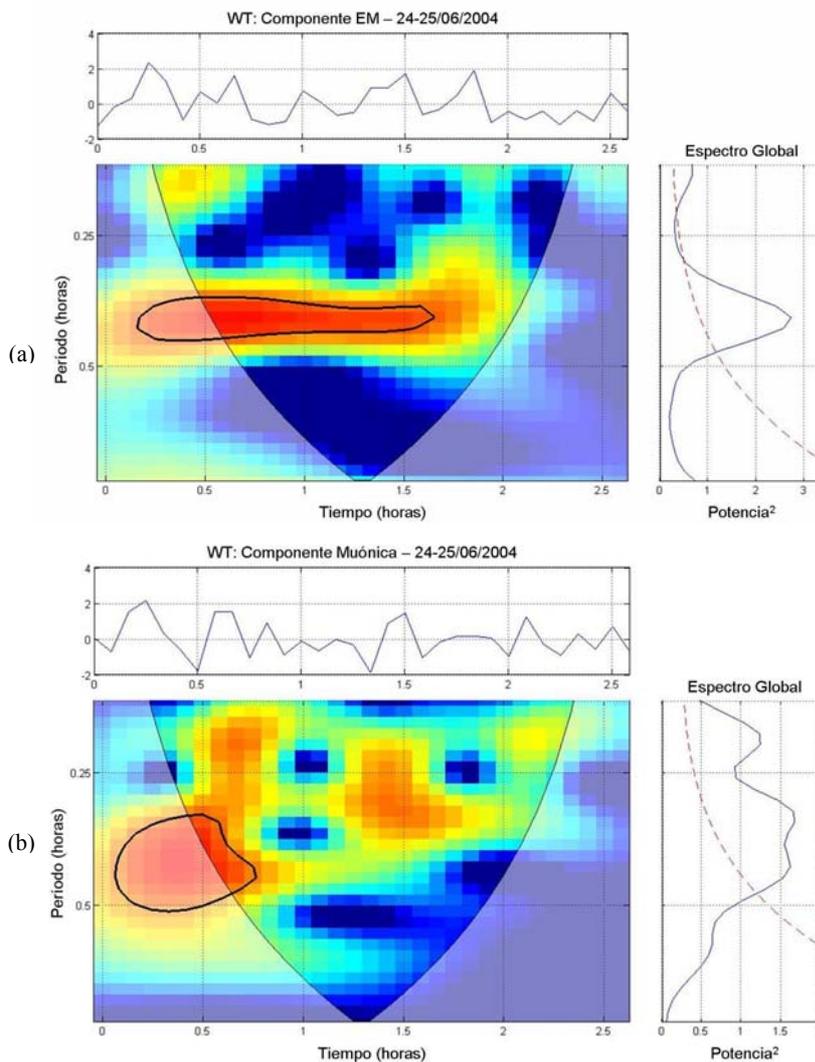
Es importante hacer mención que la potencia de estas variaciones, no puede compararse directamente con las variaciones debidas a tormentas eléctricas, debido a que cada evento es normalizado individualmente, lo cual es necesario para construir el espectro ondeleta. Una comparación de sus potencias no normalizadas se reporta más adelante, casi al final de la sección 5.5.



**Figura 5.8:** Variaciones de corta y larga duración para un día quieto típico (8 de enero de 2004); (a) Es el espectro de la componente EM, y (b) es el espectro correspondiente a la componente muónica. Descripción similar a la figura 5.6.

#### 4.4.3.4 Durante la Tormenta Eléctrica

Se realizó un tercer análisis de tiempo-frecuencia, donde se tomó únicamente, el rango de datos correspondiente a la duración de cada TE. Este análisis mostró, la presencia de variaciones de alta frecuencia muy claras, en ambas componentes, las periodicidades encontradas fueron de 10-50 minutos (ver figura 5.9); periodicidades menores no se pueden ver, debido a que la resolución del telescopio de muones, es de una muestra cada 5 minutos.



**Figura 5.9:** Variaciones de corta duración típicas durante una tormenta eléctrica (24-25 de junio de 2004); (a) Es el espectro de la componente EM, y (b) es el espectro correspondiente a la componente muónica. Descripción similar a la figura 5.6.

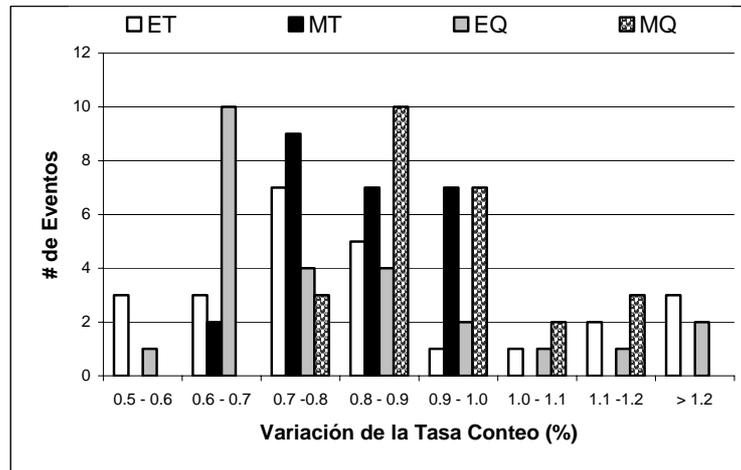
## 5.5 Resultados y Discusión

### 5.5.1 Filtrado

De la componente de alta frecuencia resultante del filtrado de las TE y de los DQ, se procedió a tomar la variación máxima durante el período de la TE, y la variación máxima del en DQ. Los resultados se muestran en la figura 5.10; donde ET y MT se refiere a las componentes EM y muónica durante tormenta eléctrica, mientras que EQ y MQ a las mismas componentes, solo que para DQ.

En la figura 5.10, se aprecia que regularmente hay variaciones de  $\pm 0.5\%$  a más de  $\pm 1.2\%$  de la tasa de conteo en la componente EM y de  $\pm 0.6\%$  a  $\pm 0.9\%$  de la tasa de conteo

de la componente muónica durante tormentas eléctricas, la variación máxima encontrada es de  $\pm 1.9\%$  de la tasa de conteo en la componente EM. En el caso de los días quietos, existen también variaciones comparables a las que ocurren durante tormentas eléctricas, la variación máxima encontrada es de  $\pm 1.4\%$ ;



**Figura 5.10:** Variaciones encontradas en la componente EM y muónica durante TE y DQ.

En general, se identificaron las TE en los datos de intensidad de los rayos cósmicos secundarios, debido a que pudieran ser la causa de un incremento en las fluctuaciones, las cuales coinciden con los datos reportados por el aeropuerto, con un desplazamiento en el tiempo de  $\pm 30$  minutos.

Las variaciones encontradas en la componente EM y en la muónica, son en promedio del orden de  $\pm 0.7$  a  $\pm 0.9\%$  de la razón de conteo, lo cual concuerda con los resultados presentados por Muraki y colaboradores en 2004, quienes reportan variaciones del orden de  $\pm 1\%$  en Norikura (Japón). Dicho lugar tiene una rigidez magnética umbral cercana a la de la Ciudad de México, es por esto que se considera como un parámetro de comparación.

El resultado de este análisis, es una evidencia de que las tormentas eléctricas influyen sobre la intensidad de los rayos cósmicos secundarios detectados en la superficie terrestre.

### 5.5.2 Prueba Estadística

El resultado de cada prueba individual, solo tuvo dos posibles soluciones, que era la validación de alguna de las siguientes hipótesis:

- Hipótesis cero (H0): Las tormentas eléctricas y los días quietos tienen la misma distribución acumulativa.
- Hipótesis uno (H1): Las tormentas eléctricas y los días quietos tienen distribuciones acumulativas diferentes.

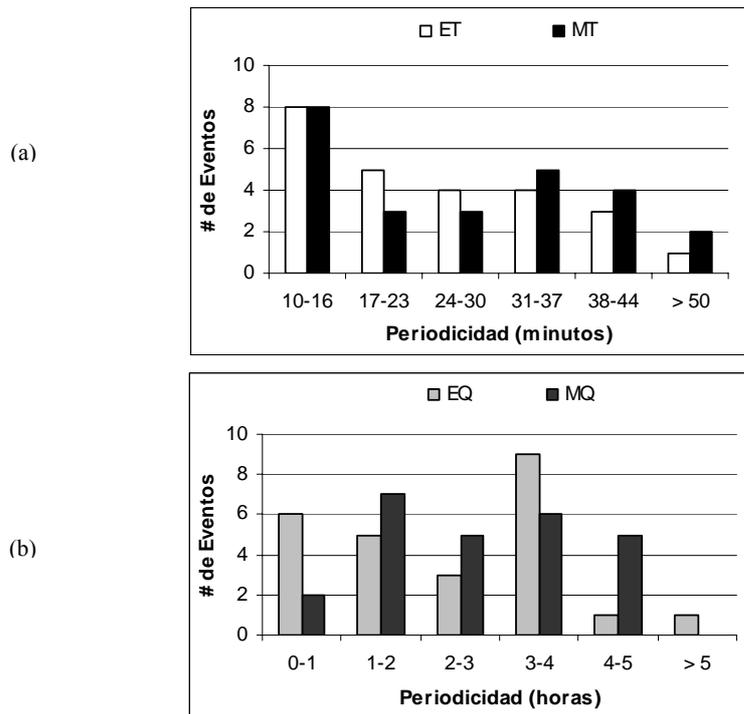
De la prueba estadística se obtuvo como resultado, la validación de la hipótesis H1, esto es, con una validación de 71.17% para la componente EM y 63.45% para la componente muónica, El resultado final indica que las tormentas eléctricas y los días quietos tienen distribuciones acumulativas ligeramente diferentes. Esto muy probablemente se deba a que la baja tasa de muestreo del telescopio de muones, provoca un efecto de atenuación.

### ***5.5.3 análisis tiempo-frecuencia***

De los tres análisis espectrales realizados anteriormente, el primero indicó la presencia de dos variaciones, durante la duración de la tormenta: una de corta duración de 10-50 minutos y otra más larga de 2-5 horas.

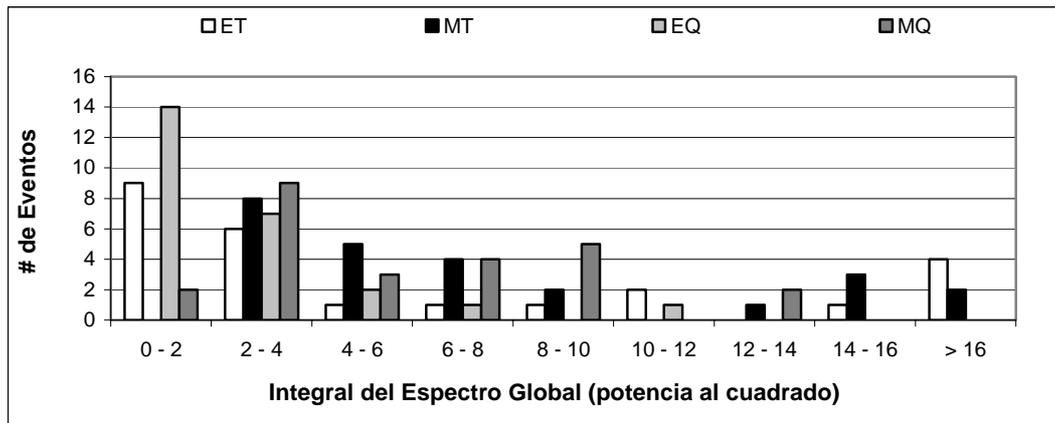
El segundo y tercer análisis proporcionaron información acerca de las periodicidades en DQ y durante períodos de TE, con el fin de comparar estos resultados, se tomaron las periodicidades más prominentes de la componente EM y muónica de los períodos durante TE (ver figura 5.11a), y durante DQ (ver figura 5.11b).

En la figura 5.11a, se aprecia claramente que durante períodos de TE, hay variaciones de alta frecuencia que van de 10-44 minutos, lo cual representa el 96% de las variaciones en la componente EM y el 92% de la muónica; mientras que en la figura 5.11b, se puede ver que las variaciones de corta duración (menores a 1 hora) en los DQ, constituyen el 24% de la componente EM y el 8% de la muónica, presentando sus variaciones más prominentes en un rango de 2-5 horas, esto llama la atención, debido a que concuerda con la variación que fue asociada a la presencia de humedad en la atmósfera. Este resultado es muy intrigante, porque los días fueron elegidos, sin presencia de nubes y lluvia; por lo que, no puede ser asociado a algún fenómeno atmosférico. Lo cual despierta la curiosidad y el interés para seguir investigando sobre este tema, ya que puede especularse, que se deba a cambios en el campo geomagnético local, o que exista la presencia de una humedad muy importante en DQ.



**Figura 5.11:** Periodicidades de las variaciones en la componente EM y muónica: (a) durante TE y (b) en DQ.

Se realizó la comparación de la potencia durante el período de tormenta eléctrica y un período semejante en días quietos, para lo cual, fue necesario formar días quietos con un intervalo de duración idéntico para cada tormenta, de esta manera se obtuvieron 25 pares de datos para cada componente. Posteriormente se calculó la integral de potencia del espectro global sin normalizar, correspondiente a cada dato, los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 5.12. Esta Gráfica muestra una distribución de potencias muy semejantes en DQ y durante TE, entre las respectivas componentes EM y muónica. Esto posiblemente sucede, porque el efecto de las TE, es atenuado a causa de la resolución del telescopio de muones, esto debido a que las descargas eléctricas tienen duraciones de microsegundos, las cuales como se ha visto en la literatura aceleran y desaceleran partículas, por lo que hay incrementos y decrementos en las razones de conteo, las cuales son sumadas en el muestreo de 5 minutos, y el resultado final es de un día normal, en la mayoría de los casos. Este efecto de atenuación representa el 80% en ambas componentes. Mientras que, el 20% restante corresponde a TE muy intensas, las cuales tuvieron grandes variaciones del campo eléctrico, lo suficientemente intensos o duraderos, que sobrevivieron el muestreo del instrumento.



**Figura 5.12:** Integral de potencia del espectro global de la componente electromagnética y muónica, durante tormentas eléctricas y en días quietos.

## 5.6 Fuentes de Incertidumbre

Dado que la estación meteorológica del Aeropuerto de la Ciudad de México, esta alejada del telescopio de muones, se tiene la siguiente problemática: (1) la hora de la ocurrencia de la tormenta eléctrica, difiere de la hora de comienzo de los disturbios en la intensidad de los rayos cósmicos secundarios, puesto que la nube tarda en llegar a Ciudad Universitaria (CU) de 15 a 30 minutos o más, dependiendo de la velocidad de los vientos; (2) en ocasiones no se ve algún efecto sobre la intensidad de los rayos cósmicos, aunque una tormenta haya sido reportada, esto es debido a que muy probablemente la nube fue disipada antes de llegar a CU, o la dirección de la tormenta era de norte a sur o viceversa, e inclusive pudo cambiar de dirección, de tal forma que nunca pasó por CU; (3) existe también la posibilidad de que una tormenta eléctrica este sobre CU y esta nunca haya llegado al aeropuerto, ya sea por la dirección que llevaba o porque se disipo en el trayecto.

La problemática anterior proporciona una incertidumbre en los datos, la cual se disminuyó, tomando en cuenta los datos reportados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), considerando una estación cercana a CU (~3 Km), además de considerar datos de descargas eléctricas, proporcionados por un satélite de la NASA, que es parte de la Misión de Medición de Precipitación Tropical, los datos están a cargo del Centro Global de Hidrología y Clima [II]. Las tormentas consideradas, fueron aquellas que coincidían con algunos de los reportes anteriores, lo cual daba una mayor probabilidad de que el efecto de estas, se observará en CU. El número de tormentas eléctricas resultantes fue de 99.

Los datos del SMN no se emplearon para el análisis, porque estos solo reportan la presencia de tormentas eléctricas, sin indicar la hora de ocurrencia y el número de tormentas durante el día. Mientras que los datos de la NASA, solo reportan 10 minutos en todo el día, debido a que el satélite, da una vuelta al planeta cada 24 horas.

# CONCLUSIONES



## 5.1 Filtrado

De los resultados del filtrado, se concluye que: la intensidad de los rayos cósmicos presenta un incremento en las variaciones de las componentes EM y muónica de la radiación secundaria, ante la ocurrencia de TE, lo cuál es muy probablemente debido a los intensos campos eléctricos que estas poseen.

## 5.2 Prueba Estadística

La prueba estadística dio como resultado, la validación de la hipótesis H1, dando una validación de 71.17% para la componente EM y 63.45% para la componente muónica, El resultado final indica que las tormentas eléctricas y los días quietos tienen distribuciones acumulativas ligeramente diferentes. Esto muy probablemente se deba a que la baja tasa de muestreo del telescopio de muones, provoca un efecto de atenuación.

Sin embargo, el hecho de que las tormentas eléctricas tienen una distribución acumulativa ligeramente diferente a días quietos, indica que existe un efecto de las tormentas eléctricas sobre los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre.

## 5.3 Análisis De Ondeletas

El resultado del análisis de tiempo-frecuencia de los alrededores de la tormenta, indicaron la presencia de dos variaciones, durante la tormenta: una de corta período de 10-50 minutos y otra más larga de 2-5 horas, tal y como fue reportado por Alexeyenko y colaboradores en 1985 [2].

Por lo que concluimos que frecuentemente las variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos, van acompañadas de dos componentes de frecuencia: una de corta duración (algunos minutos) y otra de larga duración (algunas horas). La de corta duración esta asociada con la actividad eléctrica de la tormenta, que acelera o desacelera partículas, vía el campo eléctrico. Mientras que para la segunda se podría especular, que es posiblemente debida a la humedad presente en la atmósfera, producto de la lluvia y de la presencia de nubes, debido a que dichos fenómenos ocurren, cuando suceden tales variaciones.

Del análisis de las periodicidades de TE y DQ, se concluye que, las variaciones en la intensidad de la componente EM y muónica de los rayos cósmicos secundarios, durante tormentas eléctricas tienen frecuencias mayores, que durante períodos de días quietos.

Las variaciones de potencia de los rayos cósmicos durante TE, tienen una pequeña tendencia a ser mayores que en DQ, esto lo demuestra la figura 5.12, donde se puede apreciar que el 20% de las TE analizadas, muestran variaciones de potencia mayor que en cualquier día quieto. Aunque se esperaba que el porcentaje fuera mayor, la limitante fue la resolución del detector, que atenúa el efecto de la TE por su baja frecuencia de muestreo.

## 5.4 Trabajos futuros

Incrementar la resolución del telescopio de muones, para que tome una muestra cada segundo. Así de esta manera, se pueden ver los efectos debidos a descargas eléctricas y a variaciones del campo eléctrico.

Colocar una detector de campo eléctrico junto al telescopio de muones, para posteriormente realizar un análisis de las variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos y del campo eléctrico; y ver que relación hay entre ellos. Además de poder identificar la polaridad de los campos eléctricos y de esta manera, ver que efecto tienen sobre cada componente, esto es, si acelera o desacelera partículas.

Instalar una estación meteorológica cerca del telescopio de muones, para tener una medida de todas las variables meteorológicas, y realizar la corrección debida a la humedad. Así, deberá desaparecer la variación de larga duración, quedando únicamente el efecto de la electricidad atmosférica. De esta manera, se probaría que la variación de larga duración es debida a la humedad. De lo contrario, podría deberse al efecto de los fuertes vientos, que se producen durante las tormentas, o a la suma de ambos efectos.

También sería interesante colocar un magnetómetro, cerca del instrumento, para analizar los efectos debidos a variaciones locales del campo geomagnético y ver que contribución tiene en las variaciones de los rayos cósmicos secundarios.

# APÉNDICE



## Apéndice 1: Lista de Días de Tormenta y Días Quietos

En las tablas A1.1 y A1.2, se presentan las 25 tormentas empleadas en el análisis, el orden es, de las de duración de 5 hasta 2 horas y posteriormente por fecha de ocurrencia; también se presenta en la tabla, la máxima variación de intensidad de rayos cósmicos secundarios detectada en cada componente.

Número de Tormenta	Fecha de Inicio y Final	Hora de Inicio y Final	Duración (Minutos)	Componente de Rayos Cósmicos	Máximo % de Variación
1	2004/05/10	2050	310	Electromagnética	0.5
	2004/05/11	0200		Muónica	0.8
2	2004/06/21	2152	308	Electromagnética	1.9
	2004/06/22	0300		Muónica	0.9
3	2004/04/21	2112	298	Electromagnética	0.7
	2004/04/22	0200		Muónica	0.9
4	2004/05/11	2235	265	Electromagnética	0.8
	2004/05/12	0300		Muónica	0.7
5	2004/03/31	2128	185	Electromagnética	1.1
	2004/04/01	0033		Muónica	0.8
6	2004/04/26	2345	195	Electromagnética	1.0
	2004/04/27	0300		Muónica	0.9
7	2004/05/09	0110	220	Electromagnética	0.7
		0440		Muónica	0.7
8	2004/05/17	2232	208	Electromagnética	0.7
	2004/05/18	0200		Muónica	0.9
9	2004/07/18	2145	233	Electromagnética	1.1
	2004/07/19	0138		Muónica	0.8
10	2004/10/16	0036	204	Electromagnética	0.7
		0400		Muónica	0.7
11	2004/03/18	2318	162	Electromagnética	0.8
	2004/03/19	0200		Muónica	0.8
12	2004/03/24	0145	135	Electromagnética	0.7
		0400		Muónica	0.7
13	2004/03/24	1850	164	Electromagnética	0.6
		2134		Muónica	0.7
14	2004/05/12	2311	139	Electromagnética	0.8
	2004/05/13	0130		Muónica	0.9
15	2004/06/19	0045	135	Electromagnética	0.9
		0300		Muónica	0.9
16	2004/06/19	2338	142	Electromagnética	1.2
	2004/06/20	0200		Muónica	0.6

**Tabla A1.1:** Lista de las tormentas eléctricas seleccionadas para el análisis.

<b>Número de Tormenta</b>	<b>Fecha de Inicio y Final</b>	<b>Hora de Inicio y Final</b>	<b>Duración (Minutos)</b>	<b>Componente de Rayos Cósmicos</b>	<b>Máximo % de Variación</b>
17	2004/06/24	2127	153	Electromagnética	0.7
	2004/06/25	0000		Muónica	0.6
18	2004/07/07	2158	122	Electromagnética	0.8
	2004/07/08	0000		Muónica	0.8
19	2004/07/20	0145	135	Electromagnética	1.2
		0400		Muónica	0.7
20	2004/08/19	0045	135	Electromagnética	0.5
		0300		Muónica	0.7
21	2004/08/23	2215	180	Electromagnética	0.7
	2004/08/24	0115		Muónica	0.7
22	2004/09/19	0045	135	Electromagnética	0.5
		0300		Muónica	0.9
23	2004/09/25	0133	132	Electromagnética	0.6
	2004/09/26	0345		Muónica	0.8
24	2004/09/27	2345	135	Electromagnética	0.6
	2004/09/28	0200		Muónica	0.7
25	2004/10/01	2245	162	Electromagnética	0.8
	2004/10/02	0127		Muónica	0.8

**Tabla A1.2:** Lista de las tormentas eléctricas seleccionadas para el análisis (continuación).

En las tablas A1.3 y A1.4 se presentan los 25 días quietos que fueron seleccionados, los cuales están libres de efectos geomagnéticos, decrementos Forbush, así como de la presencia de lluvia. Se ordenaron por fecha; la columna de observaciones indica las condiciones del cielo, esto es: medio nublado (MN), despejado (D), algunas nubes (AN), nublado (N), algunos cúmulos (CU), bruma (B), humo (H), neblina (NE), niebla (NI) y cielo cerrado (CC).

<b>Número de Tormenta</b>	<b>Fecha</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Componente de Rayos Cósmicos</b>	<b>Máximo % de Variación</b>
1	8 de Enero	MN, D	Electromagnética	0.8
			Muónica	0.8
2	31 de Enero	AN, MN, N, D, CU	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
3	01 de Febrero	CU, D, N, MN, AN	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.9
4	8 de Febrero	MN, D	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
5	9 de Febrero	MN, D	Electromagnética	0.7
			Muónica	0.8

**Tabla A1.3:** Lista de los días quietos seleccionados para el análisis.

<b>Número de Tormenta</b>	<b>Fecha</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Componente de Rayos Cósmicos</b>	<b>Máximo % de Variación</b>
6	20 de Febrero	MN, D, B, H	Electromagnética	0.8
			Muónica	0.9
7	21 de Febrero	MN, D, B, H	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
8	25 de Febrero	D, B, H	Electromagnética	0.8
			Muónica	1.1
9	26 de Febrero	D, B, H	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.9
10	4 de Marzo	N, MN, D, B, H	Electromagnética	0.6
			Muónica	1.0
11	5 de Marzo	N, MN, D, B, H	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
12	7 de Marzo	D, B, H, NE, N, MN	Electromagnética	0.6
			Muónica	1.1
13	8 de Marzo	D, B, H, NE, N, MN	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
14	2 de Abril	N, MN, D	Electromagnética	0.7
			Muónica	0.9
15	17 de Abril	N, MN, D, B, H	Electromagnética	0.7
			Muónica	1.0
16	18 de Abril	N, MN, D, B, H	Electromagnética	0.9
			Muónica	0.9
17	2 de Julio	AN, MN, N, D, B, H, CU	Electromagnética	1.2
			Muónica	0.7
18	03 de Octubre	N, MN, AN	Electromagnética	1.1
			Muónica	0.9
19	20 de Octubre	MN, AN, N, B, H	Electromagnética	1.0
			Muónica	0.8
20	5 de Noviembre	D, N, MN, CC, NE, NI, B, H	Electromagnética	1.4
			Muónica	0.8
21	6 de Noviembre	D, N, MN, CC, NE, NI, B, H	Electromagnética	0.7
			Muónica	0.7
22	27 de Noviembre	D, MN, B, H	Electromagnética	0.8
			Muónica	0.9
23	13 de Diciembre	MN, AN, CC, D, B, H	Electromagnética	0.6
			Muónica	0.8
24	14 de Diciembre	MN, AN, CC, D, B, H	Electromagnética	0.9
			Muónica	1.1
25	31 de Diciembre	N, MN, AN, D, B, H	Electromagnética	0.5
			Muónica	0.7

**Tabla A1.4:** Lista de los días quietos seleccionados para el análisis (continuación).

## Apéndice 2: Filtrado

Dado que los datos de rayos cósmicos contienen variaciones diarias, casi mensuales (27 días), anuales (11 y 22 años), al hacer un análisis de frecuencia de estos datos, encontraríamos estas periodicidades, que ya han sido determinadas, la variación diaria o diurna es debida a la rotación terrestre, mientras que la variación de 27 días a la rotación solar, y la de 11 y 22 años es debida a la actividad y al ciclo magnético solar. Por lo que, se hizo necesario deshacernos de estas, para lo cual, requerimos deshacernos de la tendencia de los datos.

Los medios más utilizados para detectar y eliminar la tendencia de una serie se basan en la aplicación de filtros a los datos. Un filtro no es más que una función matemática que aplicada a los valores de la serie produce una nueva serie con unas características determinadas. Entre esos filtros encontramos las medias móviles.

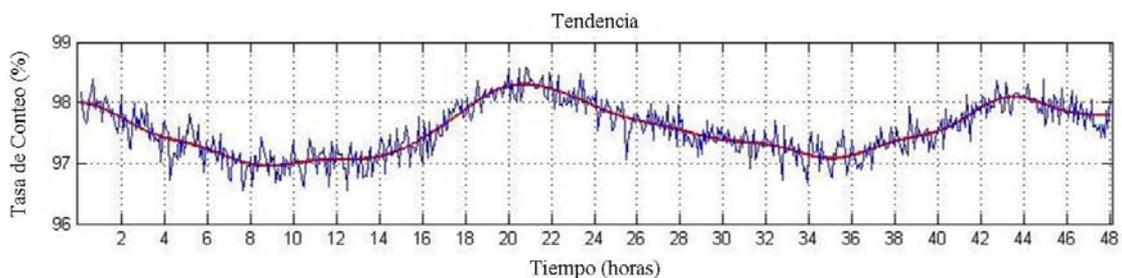
Una media móvil se calcula, para cada punto, como un promedio del mismo número de valores a cada lado de ese punto. Así una media móvil de cinco puntos sin centrar se calcula como se muestra en la ecuación A2.1.

$$m(x_t) = \frac{x_{t-2} + x_{t-1} + x_t + x_{t+1} + x_{t+2}}{5} \quad (\text{A2.1})$$

Mientras que una media móvil centrada de cinco puntos es dada por la ecuación A2.2.

$$m(x_t) = \frac{\frac{1}{2}x_{t-2} + x_{t-1} + x_t + x_{t+1} + \frac{1}{2}x_{t+2}}{5} \quad (\text{A2.2})$$

De esta manera, para encontrar la tendencia, se empleo una media móvil centrada de cinco puntos. El resultado obtenido, es la línea roja de la figura A2.1.



**Figura A2.1:** Tendencia de los datos de rayos cósmicos (línea roja).

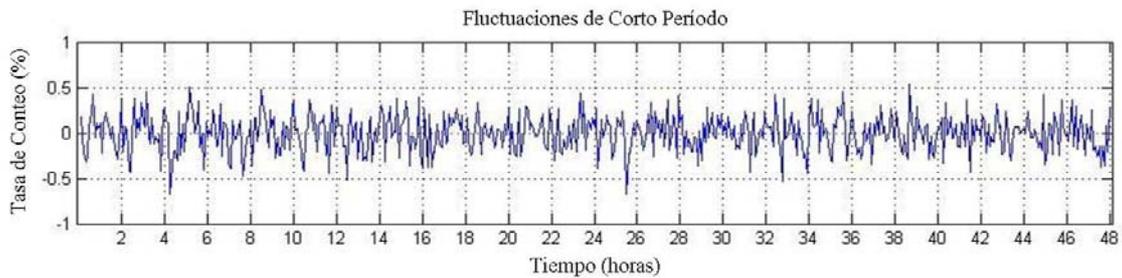
Una vez calculada la tendencia, se procede a eliminarla de los datos de rayos cósmicos, y de esta manera tener solo las fluctuaciones de período corto. Para esto, se consideran los datos de rayos cósmicos como  $S(t)$ , la tendencia como  $T(t)$  y las fluctuaciones de período corto como  $F(t)$ . Por lo que, la señal original será, la suma de  $T(t)$  y  $F(t)$  como se muestra en la ecuación A2.3.

$$S(t) = T(t) + F(t) \quad (A2.3)$$

De esta manera, para conocer las fluctuaciones, se despeja  $F(t)$  de A2.3, obteniendo:

$$F(t) = S(t) - T(t) \quad (A2.4)$$

La información resultante de la ecuación A2.4, representa las fluctuaciones de corto período, esto se aprecia en la figura A2.2.



**Figura A2.2:** Fluctuaciones de corto período en los datos de rayos cósmicos.

Este filtrado se realizó a todos los datos de rayos cósmicos, y de esta manera, se analizó únicamente la componente de alta frecuencia o de período corto.

### Apéndice 3: Prueba Estadística Kolmogorov-Smirnov para Dos Muestras

La prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras es una prueba de si dos muestras independientes se han extraído de la misma población o de dos poblaciones con la misma distribución.

La prueba para dos muestras centra su interés en las frecuencias acumulativas; de esta manera: si las muestras han sido extraídas de la misma distribución poblacional, entonces las distribuciones acumulativas de ambas tendrían que ser sumamente cercanas; en caso contrario, si las distribuciones acumulativas están demasiado alejadas, esto sugiere que las muestras provienen de poblaciones distintas.

#### A3.1 Método

Antes de aplicar el método, debe quedar claro que en esta prueba existen sólo dos hipótesis:  $H_0$ : las muestras son parte de la misma población y  $H_1$ : las muestras son de poblaciones diferentes.

Ahora bien para aplicar la prueba Kolmogorov-Smirnov, se debe determinar la distribución de frecuencias acumuladas para cada muestra, utilizando los mismos intervalos para ambas distribuciones. Entonces en cada intervalo se resta al valor anterior el valor que le sigue, la prueba se centra en las mayores desviaciones observadas.

Definamos  $S_m(X)$  como la distribución acumulativa que se observa, para una muestra (de tamaño  $m$ ), esto es,  $S_m(X) = K / m$ , donde  $K$  es el número de datos iguales o menores que  $X$ . Definamos también  $S_n(X)$  como la distribución acumulativa que se observa en la otra muestra, esto es,  $S_n(X) = K / n$ . Ahora la Prueba estadística Kolmogorov-Smirnov es:

$$D_{m,n} = \max |S_m(X) - S_n(X)| \quad (\text{A3.1})$$

La distribución muestral  $D_{m,n}$  es conocida mediante la formula A3.1. Y el siguiente paso a seguir es comparar con el valor crítico del estadístico, el cual varía dependiendo el nivel de significancia ( $\alpha$ ) elegido y el tamaño de las muestras, por ejemplo, en una prueba donde  $m = 6$  y  $n = 8$ , se rechazaría  $H_0$  en el nivel de  $\alpha = 0.01$  (99%) donde  $D_{m,n} \geq 38$ . De esta manera, tenemos que si el valor absoluto máximo determinado por A3.1 es mayor que el valor crítico del estadístico, significa que las distribuciones son de poblaciones diferentes, es decir, estaríamos aceptando la hipótesis  $H_1$ .

## **Apéndice 4: El Análisis de Ondeletas (wavelet)**

Este apéndice es una guía práctica del análisis de ondeletas, el cual fue tomado de [66]. El análisis de ondeletas, se ha convertido en una herramienta muy común, para localizar variaciones de potencia en una serie de tiempo, mediante la descomposición de una serie de tiempo dentro del espacio frecuencia-tiempo, la cual es capaz de determinar, los modos dominantes de variabilidad y como estos modos varían en el tiempo. La transformada ondeleta se ha utilizado en numerosos estudios de geofísica, incluyendo la convección tropical, los frentes fríos atmosféricos, la temperatura central de Inglaterra, la dispersión de ondas oceánicas, y estructuras coherentes en flujos turbulentos.

Desafortunadamente, muchos estudios que emplean el análisis de ondeletas han sufrido de una aparente falta de resultados cuantitativos. La transformada ondeleta es considerada por muchos, como una interesante y divertida forma de producir imágenes coloridas, con resultados puramente cualitativos. Este concepto erróneo, es en cierto modo culpa del análisis de ondeletas en sí, ya que esta implica una transformación de una serie de tiempo unidimensional (o espectro de frecuencia), a una difusa imagen bidimensional de frecuencia-tiempo. Esta prolijidad se ha visto agravada por el uso arbitrario de normalizaciones, y la falta de pruebas estadísticas.

### ***A4.1 Los Datos***

Cuando se tiene una serie de tiempo, es importante determinar si los datos tienen una secuencia de valores aleatorios o sí, por el contrario, se puede encontrar algún patrón a lo largo del tiempo, para poder seguir con el análisis.

La metodología tradicional del estudio de series temporales, es bastante sencilla de comprender, y fundamentalmente se basa en descomponer la serie en: tendencia, variación estacional o periódica, y otras fluctuaciones irregulares. La finalidad de esto, es quitar todas aquellas tendencias y periodicidades que son debidas a algún fenómeno conocido, y que no son de interés, esto se realiza mediante un filtrado.

### ***A4.2 La Transformada de Fourier por Ventana***

Esta representa una herramienta de análisis para extraer información de la frecuencia local de una señal. La transformada de Fourier es realizada desplazando un segmento de longitud  $T$  de una serie de tiempo, con pasos de tiempo  $\delta t$  y una longitud total  $N\delta t$ , considerando frecuencias de regreso de  $T^{-1}$  a  $(2\delta t)^{-1}$  en cada paso del tiempo. Los segmentos de cada ventana, pueden ser empleando una función arbitraria o una ventana Gaussiana.

La transformada de Fourier por ventana representa un impreciso e ineficiente método de localización de frecuencia-tiempo, el cual impone una escala o “intervalo de respuesta”  $T$  dentro del análisis. La inexactitud surge del aliasing de las componentes de

alta y baja frecuencia, que no entran en el rango de frecuencia de la ventana. La ineficiencia viene de las frecuencias  $T/(2\delta t)$ , que se debe analizar en cada paso de tiempo, independientemente del tamaño de la ventana o de la frecuencia dominante presente. Además, se deben analizar varias longitudes de ventana, para determinar la de mejor calidad. Para análisis donde una escala predeterminada, no es apropiada para una amplia gama de frecuencias dominantes, un método de localización de tiempo-frecuencia que es independiente de la escala, como el análisis de ondeletas, debe emplearse.

### ***A4.3 La transformada Ondeleta***

La transformada ondeleta puede ser usada para analizar series de tiempo que contienen potencias no estacionarias con diferentes frecuencias. Para el análisis espectral de ondeleta se asume que se tiene una serie de tiempo,  $x_n$ , con un espaciado de tiempo  $\delta t$  y  $n=0 \dots N-1$ , además uno tiene una *función ondeleta madre*,  $\psi_0(\eta)$ , que depende de un parámetro  $\eta$  que no tiene dimensiones en tiempo. Para ser aceptable como una ondeleta, esta función debe tener promedio cero y ser localizada en ambos espacios de tiempo y frecuencia. Lo anterior significa lo siguiente:

- 1.- El valor medio de  $\psi_0(\eta)$  es igual a cero.
- 2.- La dispersión de  $\psi_0(\eta)$  es igual a cero.
- 3.- Todos los momentos  $\psi_0(\eta) > 2$  deben ser igual a cero.
- 4.-  $\psi_0(\eta)$  debe de convergir rápidamente a cero a medida que se aleja del origen.

#### ***A4.3.1 Función Ondeleta***

El término “Función Ondeleta Madre” se ocupa para referirse tanto a funciones de ondeletas ortogonales como no ortogonales. El término “Base de Ondeletas” se refiere solo a un conjunto de funciones ortogonales. El uso de una base ortogonal implica el uso de transformadas de ondeletas discretas, mientras que una función de ondeletas no ortogonal puede ser usada tanto con la transformada ondeleta discreta o continua. La transformada de ondeletas discreta se utiliza para la codificación de señales, mientras que la transformada continua se utiliza para el análisis de señales. Para seleccionar una función ondeleta madre  $\psi_0(\eta)$  hay que considerar ciertos factores (para más discusión ver referencias de [66]).

- 1) *Ortogonal o no-ortogonal.* En el análisis de ondeletas no-ortogonal, el número de convoluciones en cada escala es proporcional al ancho de la base ondeleta en esa escala. Esto produce un espectro de ondeleta que contiene bloques discretos de la potencia ondeleta y es útil para el procesamiento de señales mientras éste dé la representación más compacta de la señal. Desafortunadamente, para el análisis de la serie de tiempo, un cambio no periódico en la serie de tiempo produce un espectro de ondeleta diferente. Asimismo, un análisis no-ortogonal, es altamente redundante a grandes escalas, donde el espectro de ondeleta en tiempos adyacentes es altamente

correlacionado. La transformada no-ortogonal es útil para el análisis de series de tiempo, donde se espera suavizar variaciones continuas en la amplitud ondeleta.

- 2) *Real o Compleja*. Una función de ondeleta compleja devolverá información acerca de la amplitud y fase, adaptándose mejor para la captura de una conducta oscilatoria. Una función de ondeleta real devuelve solo una componente y puede ser usada para aislar picos o discontinuidades.
- 3) *Anchura*. El ancho de la función ondeleta se define como el tiempo de doblamiento de la amplitud ondeleta. La resolución de la función ondeleta se determina por el balance entre el ancho en el espacio real y el ancho en el espacio de Fourier. Una función angosta en tiempo, tendrá buena resolución pero poca resolución en frecuencia, mientras que una función amplia tendrá poca resolución en tiempo, mientras que buena resolución en frecuencia.
- 4) *Forma*. La función ondeleta debe reflejar el tipo de características presentes en la serie de tiempo. Para una serie de tiempo con saltos de corte o escalones, uno seleccionaría una función como Harr, mientras que para una serie de tiempo lisa y cambiante, uno seleccionaría una función lisa tal como un coseno amortiguado.

Las funciones ondeletas no-ortogonales más conocidas son: Paul y Morlet, ambas complejas, mientras que la DOG es real. Otros tipos de wavelet existen, tal como la Haar y Daubechies, las cuales son usadas para análisis de ondeletas ortogonales. Para más ejemplos de bases y funciones de Ondeletas, ver referencias de [66].

La transformada ondeleta continua de una señal discreta  $x_n$  se define como la convolución de  $x_n$  con una versión escalada y trasladada de  $\psi_0(\eta)$ :

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \left[ \frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] \quad (\text{A4.1})$$

donde (\*) indica el conjugado complejo. Al variar la escala ondeleta  $s$  y trasladando a lo largo del índice de tiempo  $n$ , uno puede construir una imagen mostrando tanto la amplitud de cualquier característica de la escala y cómo ésta amplitud varía con el tiempo. El subíndice 0 en  $\psi$  significa que la función ha sido normalizada.

### A4.3.2 Normalización

La función ondeleta en cada escala  $s$  está normalizada para tener energía unitaria:

$$\hat{\psi}(sw_k) = \left( \frac{2\pi s}{\delta t} \right)^{1/2} \hat{\psi}_0(sw_k) \quad (\text{A4.2})$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \hat{\psi}_0(w') \right|^2 dw' = 1 \quad (\text{A4.3})$$

### **A4.3.3 Espectro de Potencia Ondeleta**

La función de Ondeletas  $\psi_0(\eta)$  es en general compleja, por lo que la transformada ondeleta  $W_n(s)$  es también compleja.

La transformada ondeleta se puede dividir en la parte real  $R(W_n(s))$  y parte imaginaria,  $I(W_n(s))$ , en amplitud,  $|W_n(s)|$  o en fase  $\tan^{-1}[I(W_n(s))/R(W_n(s))]$ . El espectro de potencia ondeleta es definido como  $|W_n(s)|^2$ . Para funciones Ondeletas reales como la DOG (derivadas de una gaussiana) la parte imaginaria es cero y la fase no está definida.

### **A4.3.4 Cono de influencia**

Ya que uno está tratando con series de longitud de tiempo finita, habrá errores al principio y al final del espectro de potencia ondeleta. Una solución es rellenar el final de la serie de tiempo con ceros para llevar la longitud total  $N$  a la siguiente potencia mas alta de dos, limitando los efectos de borde. Para una serie cíclica, no hay necesidad de llenar con ceros y no hay cono de influencia (COI).

Rellenar con ceros introduce discontinuidades en los puntos finales, mientras uno se acerca a escalas más grandes, decrece la amplitud cercana a los bordes, así como muchos ceros entren al análisis. El COI es la región del espectro ondeleta en el cual los efectos de borde llegan a ser importantes y se define aquí el tiempo de doblamiento para la autocorrelación de la potencia ondeleta en cada escala.

El tamaño del COI en cada escala también da una medida del tiempo de decorrelación para un solo pico en la serie de tiempo. Al comparar el ancho de un pico en el espectro de potencia ondeleta con este tiempo de decorrelación, uno puede distinguir entre un pico en la información (posiblemente debido a ruido aleatorio) y una componente armónica en la frecuencia de Fourier equivalente.

### **A4.4 Espectro Teórico y Niveles de Significancia**

Para determinar los niveles de significancia para el espectro ondeleta, es necesario un espectro de comparación. Entonces se asume que las diferentes realizaciones del proceso

geofísico serán aleatoriamente distribuidas entorno a este promedio o espectro de comparación y el espectro actual puede ser comparado contra esta distribución. Para muchos fenómenos geofísicos, un espectro apropiado es tanto ruido blanco (con un espectro de Fourier plano) como el ruido rojo (incrementando la potencia con la frecuencia decreciente).

#### ***A4.4.1 Espectro de fourier de ruido rojo***

Muchas series de tiempo geofísicas pueden ser modeladas tanto de ruido rojo (Ruido Markoviano) como ruido blanco. Un simple modelo para el ruido rojo es el proceso autoregresivo de primer orden (lag-1):

$$x_n = \alpha x_{n-1} + z_n \quad (\text{A4.4})$$

donde  $\alpha$  es la autocorrelación lag-1 asumida,  $x_0 = 0$ , y  $z_n$  es obtenida a partir del ruido blanco gaussiano de (A4.4), después de la normalización, es

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \quad (\text{A4.5})$$

donde  $k = 0 \dots N / 2$  es el índice de frecuencia. Por lo tanto, al seleccionar una apropiada autocorrelación lag-1, uno puede usar (A4.5) para modelar el espectro de ruido. Para  $\alpha = 0$  en (A4.5) obtenemos un espectro de ruido-blanco.

#### ***A4.4.2 Niveles de Significancia***

Para el espectro de potencia ondeleta se define como sigue: se asume que la serie de tiempo tiene un espectro de potencia promedio, posiblemente dado por (A4.5); si un pico en el espectro de potencia ondeleta está significativamente arriba de este espectro anterior, entonces se puede asumir que es una característica verdadera con un cierto porcentaje de confianza. Para definiciones, “Significante a un 5% de nivel” es equivalente a “95% de nivel de confianza” e implica una prueba contra un cierto nivel anterior, mientras que “el intervalo de confianza de 95%” se refiere al rango de confianza de un valor dado.

#### ***A4.4.3 Espectro Global Ondeleta***

Un corte vertical en el espectro ondeleta es una medida del espectro local, entonces el espectro ondeleta de tiempo promediado sobre un cierto periodo es:

$$\bar{W}_n^2(s) = \frac{1}{n_a} \sum_{n=n_1}^{n_2} |W_n(s)|^2 \quad (\text{A4.6})$$

donde el índice  $n$  es asignado arbitrariamente al punto medio de  $n_1$  y  $n_2$  y  $n_a = n_2 - n_1 + 1$ , este es el número de puntos que están en el promedio. Al repetir (A4.6) en cada paso de tiempo, uno crea un gráfico de ondeleta suavizado por una cierta ventana.

El caso extremo de (A4.7) es cuando el promedio está sobre todo el espectro local ondeleta, lo cual da el *espectro global ondeleta*.

$$\bar{W}_n^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (\text{A4.7})$$

#### A.4.5 Gráfico

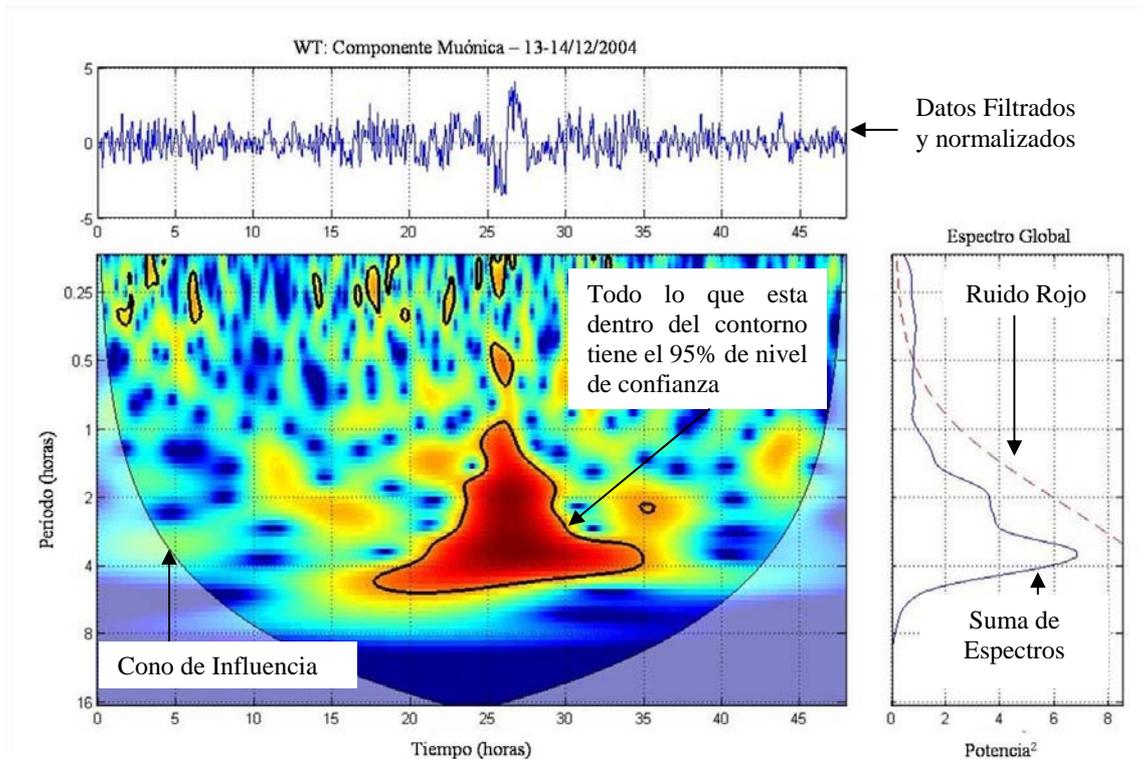


Figura A4.1: Descripción de un gráfico resultante de un análisis de ondeleta.

# **BIBLIOGRAFÍA**



## Libros y Publicaciones:

- [1] Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P., Arneodo F., Bergamasco L., Bertaina M., Brunetti M., Castagnoli C., Castellina A., Cattani D., Cecchini S., Chiavassa A., Cini G., D'Ettore Piazzoli B., Di Sciascio G., Fulgione W., Galeotti P., Galli M., Ghia P.L., Giovannini G., Iacovacci M., Mannocchi G., Morello C. Navarra G., Pagliarin A., Saavedra O., Trincherio G.C., Vallania P., Vernetto S. and Vigorito C. *Gamma-Rays and Ionizing Component During Thunderstorms at Gran Sasso*, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, Vol. 7, 1999, pp. 351-354.
- [2] Alexeenko V.V., Chudakov A.E., Sborshikov V.G., and Tizengauzen V.A. *Short Perturbations of Cosmic Rays Intensity and Electric Field in Atmosphere*, Proc. 19th ICRC, La Jolla, Vol. 5, 1985, pp. 352-355.
- [3] Alexeenko V.V., Chernyaev A.B., Chudakov A.E., Khaerdinov, N.S., Ozrokov S.S., and Sborshikov V.G. *Short perturbations of cosmic ray intensity and electric field in atmosphere*. Proc. 20th ICRC, Moscow, vol.4, 1987, p. 272.
- [4] Alexeenko V.V., Khaerdinov, N.S., Lidvansky A.S., and Petkov V.B. *Electric Field Disturbances in the Summer-Time Atmosphere and Associated Variations of CR Intensity*, Proc. 27th ICRC, 2001, pp. 4161-4164.
- [5] Alexeenko V.V., Khaerdinov, N.S., Lidvansky A.S., and Petkov V.B. *Transient Variations of Secondary Cosmic Rays due to Atmospheric Electric Fields and Evidence for Pre-Lightning Particle Acceleration*, Phys. Lett., A301, 2002, pp. 299-306.
- [6] Bateman, M.G., Marshall, T.C. and Rust, W.D. *Precipitation charge and size measurements inside a New México mountain thunderstorms*, Journal Geophysics Research 104, 1999.
- [7] Cane H.V., *Coronal mass ejections and Forbush decreases*, Space Sci. Rev. 93, 2000, p. 55-57.
- [8] Carmichael H. *Instruction Manual No.7, Cosmic Rays*, Special Committees for IQSY, Londres, 1964.
- [9] Chapman S. *Cosmic Rays and Magnetic Storms*. Nature 140, No 3540, 1937, p. 423.
- [10] Chapman S., Bartels J., *Geomagnetism*. Oxford University Press, New York, 1940.
- [11] Chauzy, S. y Soula, S. *Contribution of the ground corona ions to the convective charging mechanism*, Atmospheric Research, 1999.
- [12] Compton A.H., Wollan E.O. y Bennet R.D., Rev. Sci. Inst. 5, 1934, p. 415.

- [13] Curran L. *Luminescence and the Scintillation Counter*, Butterworth Sci. Publ., Londres, 1953.
- [14] Dorman L.I. *Cosmic Rays Variations*. Gostekhteorizdat, Primera Edición, Moscú, 1957.
- [15] Dorman L.I. *Cosmic Rays: Variations and Space Explorations*. North Holland Publishing Company, Primera Edición, Amsterdam, 1974.
- [16] Dorman L.I. *Geomagnetic and Atmospheric Effects in Primary and Secondary Cosmic Rays*. North Holland Publishing Company, Primera Edición, Amsterdam, 1987.
- [17] Dorman, L. I., I. V. Dorman, *Cosmic ray atmospheric electric field effects*, Canadian J. of Physics, 73, 1995, pp. 440.
- [18] Dorman L.I., Dorman I.V., Villorresi G., Iucci N., Parisi M. *Expected time-variations of neutron monitor counting rate caused by CR particle energy change in the periods of thunderstorms*, Proc. 25th ICRC, Durban (South Africa), Vol. 7, 1997, pp. 349-352.
- [19] Dutt J.C., *Tesis de Doctorado*, Universidad de Londres, Londres, 1965.
- [20] González Méndez L. X., *Efectos de los Campos Eléctricos Atmosféricos en los Rayos Cósmicos Detectados en la Superficie Terrestre*. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica-UNAM, México, 2003.
- [21] González Méndez L.X. & Valdés-Galicia J.F. *Atmospheric Electric Field Effects of Cosmic Rays Detected in Mexico City*, Geofísica Internacional, Vol. 45, Num. 4, 2006, pp. 255-262.
- [22] Gutshina R.T., Dorman L.I., Kaminer N.S., Khadakhanova. *Metereological Effects of Cosmic Rays*. Proc. Int. Cosmic Rays, Calgary, 1967.
- [23] Hayakawa S., Nagata T., Nishimura J., Sugiera M. *Note on the Effect of the Equatorial Ring Current on Cosmic Ray Intensity*. J. Geophys. Res. 55, No2, 1960, p. 221.
- [24] Hayakawa S. *Cosmic Rays Physics*, Ed. Wiley, Nueva york, 1969.
- [25] Hernández García Alberto, *Registro y Corrección de Efectos Atmosféricos en los Datos de Muones de C.U., D.F.* Tesis Profesional, Facultad de Ciencias-UNAM, México, 2004.
- [26] Janossy L. *Cosmic Rays*, Oxford at the Clarendon Press, Segunda Edición, Gran Bretaña, 1950.

- [27] Jayaratne, E.R. y Saunders, C.P.R. *The rain gush, lightning and the lower positive charge center in thunderstorms*, Journal Geophysics Research 89, 1984.
- [28] Johnson T. H. *Cosmic Ray Intensity and Geomagnetic Effects*. Rav. Mod. Phys. 10, No 4.
- [29] Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B., and Surovetsky Yu P. *Effect of Disturbed Electric Field of the Atmosphere on Cosmic Rays: 1. Soft Component*, Proc. 28th ICRC, 2003, pp. 4169-4172.
- [30] Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B. *Effect of Disturbed Electric Field of the Atmosphere on Cosmic Rays: 2. Hard Component*, Proc. 28th ICRC, 2003, pp. 4173-4176.
- [31] Khaerdinov N.S. & Lidvansky A.S. *Variations of Intensity of Cosmic Rays Muons due to Thunderstorms Electric Fields*, Proc. 29th ICRC, 2005, pp. 101-104.
- [32] Khaerdinov N.S. & Lidvansky A.S. *A Strong Enhancement of Cosmic Rays Intensity During Thunderstorm: A Case Study and Implications*, Proc. 29th ICRC, 2005, pp. 101-104.
- [33] Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B. *Cosmic Rays and the Electric Field of Thunderclouds: Evidence for Acceleration of Particles (Runaway Electrons)*, Atmospheric Research 76, 2005, pp. 346-354.
- [34] Kawasaki S. *On the Anomalous Time Variation in Cosmic Ray Neutron Intensity caused by Atmospheric Pressure Deviation due to High Wind*, Scient. Papers Inst. Phys. And Chem. Res. 60, No 2, 1966, p.3.
- [35] Kigoshi K., Hasegawa H., Yamakoshi K., Shibata S., Kuroya H., MiwaT., Mitani S., Oshio T. *Variation of  $^{14}\text{C}$  content in the Atmosphere during the Past Two Thousand Years*. Proc. Intern. Conf. Cosmic Rays 1, Londres, 1965, p. 597-600.
- [36] Lidvansky A.S. *The Effect of the Electric Field of the Atmosphere on Cosmic Rays*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **29**, 2003, p. 925-937.
- [37] Lockwood J.A., Calawa A.R. *On the Barometric Pressure Coefficient for Cosmic Ray Neutrons*, J. Atmospheric Terrest. Phys. 11, 1957, p. 23-31.
- [38] Loeb L.B. *The mechanism of steeped and dart leaders in cloud to ground lightning strokes*, J. Geoph. Res. Vol 71, 1966, p. 4711-4721.
- [39] Longair M. S. *High Energy Astrophysics*. Volume I: Particles, Photons and their Detection. Cambridge University Press, Segunda Edición, Nueva York, 1992.

- [40] MacGorman, D.R. y Rust, W.D. *The Electrical Nature of Thunderstorms*, Oxford University Press, Primera Edición, New York, 1998.
- [41] Magono, C. *Thunderstorms*, Elsevier, Primera Edición, New York, 1980.
- [42] Malan, D.J. *Les discharges dans l'air et la charge inférieure positive d'un nuage orageuse*. Annual Geophysic 8, 1952.
- [43] Malan, D.J. *Physics of lightning*. The English Universities Press Ltd., Londres, 1963.
- [44] Marsh, S.J. y Marshall, T.C. *Charged precipitation measurements before the first lightning flash in a thunderstorm*, Journal Geophysics Research 98, 1993.
- [45] Marshall, T.C. y Stolzenburg, M. *Estimates of cloud charge densities in thunderstorms*, Journal Geophysics Research 103, 1998.
- [46] Marshall, T.C. y Win, W.P. *Measurements of charged precipitation in a New México thunderstorm: lower positive charge centers*, Journal Geophysics Research 87, 1982.
- [47] Marshall, T.C. y Win, W.P. *Comments on "The 'rain gush', lightning, and the lower positive center in thunderstorms"* por E.R. Jayaratne y C.P.R. Saunders, Journal Geophysic Research 90, 1985.
- [48] Muraki Y., Miyamoto Y., Takami T., Axford W.I., Matsubara Y., Masuda K., Sako T., Watanabe K., Sakakibara S., Shibata S., Munakata Y., Munakata K., Yasue S., Sakai T. Mitsui K. Flueckiger E.O. *Acceleration Below Thunder Clouds at Mount Norikura*, 28th ICRC, 2003, p. 4177-4180.
- [49] Muraki Y., Axford W.I., Matsubara Y., Masuda K., Miyamoto Y., Menjyou H., Sakakibara S., Sako T., Takami T., Yamada T., Phys. Rev. D69, No 123010, 2004, p. 1-13.
- [50] Obayashi T. *Entry of High Energy Particles into the Solar Ionosphere*. Rept. Ionosphere and Space Res. Japan, 13, No 3, 1959, p. 201-209.
- [51] Otaola J.A. & Valdés-Galicia J. F. *Los Rayos Cósmicos: Mensajeros de las Estrellas*, F. C. E. Primera Edición, México, 1992.
- [52] Otaola J.A., Musalem O., Moreno J.M. *Sistema Multidireccional de Detectores de la Componente Mesónica de la Radiación Cósmica Secundaria*, Instituto de Geofísica-UNAM, México, 1988, p. 28.
- [53] Phillips, B.B. *Convected cloud charge in thunderstorms*, Mon. Wea. Rev., 1967.
- [54] Planck, M. *Theory of Heat radiation*, Translated by M. Masius, Dover 1956.

- [55] Rakov, V.A. y Uman, M.A. *Lightning. Physics and Effects*. Cambridge University Press, Primera Edición, Reino Unido, 2003.
- [56] Rivera López A.L. *Generación de Campos Magnéticos Planetarios: El Modelo de Dinamo*, Serie Docencia y Divulgación No 56, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- [57] Rossi B. *High Energy Particles*, Ed. Prentice Hall, New York, 1952.
- [58] Rothwell P. *Magnetic Cutoff rigidities of charged particles in the Earth's Field at Times of Magnetic Storms*. J. Geophys. Res. 64, No 11, 1959, p. 2026-2028.
- [59] Sandström A. E. *Cosmic Rays Physics*. North Holland Publishing Company, Primera Edición, Amsterdam, 1965.
- [60] Serway Raymond A. *Física*. Tomo II, McGraw-Hill, Cuarta Edición, México, 1999.
- [61] Shukla C.T., Singh R.L., Agrawal S.P., *Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar streams*, Indian J. Radio Space Phys. 8, India, 1979, p. 230-232.
- [62] Siegel, S. *Estadística No Paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta*, Trillas, México, 1982.
- [63] Simpson J.A., phys. Rev., 94, 1954, p. 426.
- [64] Swank W., Ann. Rev. Nuc. Sci., 4, 1954, p. 111.
- [65] Takami T., Muraki Y., Matsubara Y., Masuda K., Sako T., Sakakibara S., Murata T., Tsuchiya H., Yamamoto D., Axford W.I., Shibata S., Munakata Y., Munakata K., Yasue S., Sakai T., Mitsui K., Flückiger E.O. *Particles Acceleration in Thunderstorms*, Proc. 27th ICRC, 2001, pp. 4027-4030.[62]
- [66] Torrence C. and Compo G.P., *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 79. No. 1, 1998, pp. 61-78.
- [67] Uman, M.A. *Lightning Discharge*, Academic Press, New York, 1987.
- [68] Uman, M.A. y Krider, E.P. *Natural and artificially initiated lightning*. Science 246, 1989.
- [69] Valdés-Galicia J. F. *Variaciones Espectrales de la Radiación Cósmica Durante Decrecimientos Forbush*. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias-UNAM, México, 1977.
- [70] Vernetto S. *The EAS counting rate during thunderstorms*, Proc. 27th ICRC, 2001, pp. 4165-4168.

- [71] Wallace, J.M., y Hobbs, P.V. *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. Academic Press, Primera Edición, Reino Unido, 1977.
- [72] Wilson C.T.R., *The Acceleration of  $\beta$ -Particles in Strong Electric Fields Such as Those of Thunderclouds*, Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol. 22, 1925, pp. 534-538.

### **Internet:**

- [I] Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA

[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_12/cosmic\\_rays.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/cosmic_rays.html)

- [II] Centro Global de Hidrología y Clima de la NASA

<http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/>

- [III] Centro Nacional de Datos Geofísicos del NOAA

[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUNSPOT\\_NUMBERS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/)  
[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/COSMIC\\_RAYS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/COSMIC_RAYS/)  
[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/INDICES/KP\\_AP/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/)

- [IV] Software de Análisis Numérico (MATLAB)

<http://www.mathworks.com/>