



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

Variaciones en la componente secundaria de los rayos cósmicos galácticos, detectadas por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México, atribuidas a campos eléctricos atmosféricos

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

BERTHA JANIA NEWTON BOSCH



DIRECTOR DE TESIS:
DR. LUIS XAVIER GONZÁLEZ MÉNDEZ

Ciudad Universitaria, CD. MX, 2018



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.

1. Datos del alumno

Newton

Bosch

Bertha Jania

55 32 72 36 03

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra con orientación a Ciencias Espaciales

311692947

2. Datos del asesor

Dr

Luis Xavier

González

Méndez

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Mario

Rodríguez

Martínez

4. Datos del sinodal 2

Dra.

María

Sergeeva

5. Datos del sinodal 3

Dra.

Marni Margarita

Pazos

Espejel

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Ernesto

Ortiz

Fragoso

7. Datos del trabajo escrito

Variaciones en la componente secundaria de los rayos cósmicos galácticos, detectadas por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México, atribuidas a campos eléctricos atmosféricos

80

2018

Dedicatoria

Para mis padres, por su inagotable apoyo y su amor incondicional. Por fijar un camino que he podido seguir con la frente en alto y por tener la fortuna de ser una fuente de orgullo para ellos.

Para todos mis amigos, por la aportación tan especial que cada uno ha hecho en mi vida y por acompañarme durante esta hermosa travesía. Ha sido y seguirá siendo un placer tenerlos conmigo.

Agradecimientos

Al Dr. Luis Xavier González Méndez, por su asesoría, sus enseñanzas y el apoyo que me ha brindado. Por tener siempre abiertas las puertas de su oficina.

A todos aquellos profesores que me supieron enseñar algo trascendental en algún momento de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, siempre será un honor ser estudiante de la máxima casa de estudios.

A cada miembro de mi familia, por ser mi ejemplo de unión, fuerza y perseverancia. Quiero agradecer especialmente a mis primos hermanos, por tener una chispa única y ser una parte fundamental de mí.

“Great is the art of beginning but greater is the art of ending.”
- Lazarus Long.

Índice general

INTRODUCCIÓN	7
RESUMEN	9
CAPÍTULO 1: Rayos cósmicos	10
1.1 Introducción	11
1.1.1 Abundancia relativa de cada elemento en la RC	11
1.2 Espectro de energía de los rayos cósmicos	13
1.3 Modulación de rayos cósmicos debida al Sol	15
1.3.1 La variación de 11 años	16
1.3.2 El decrecimiento Forbush	18
1.3.3 La variación diurna	19
1.4 Efectos del campo geomagnético sobre la intensidad de rayos cósmicos	20
1.4.1 La rigidez umbral	20
1.5 Chubascos atmosféricos	21
CAPÍTULO 2: Tormentas eléctricas	24
2.1 Introducción	25
2.2 Formación de tormentas eléctricas	26
2.2.1 Fase de cúmulo	27
2.2.2 Fase de madurez	28
2.2.3 Fase de disipación	28
2.3 Producción de campos eléctricos atmosféricos	29
2.3.1 Condiciones de buen tiempo	31
2.3.2 Condiciones de tormenta	31
2.3.2.1 Proceso de electrificación de una nube de tormenta	32
2.3.2.2 Campos eléctricos producidos por una nube cumulonimbus	33
2.3.2.3 Las descargas eléctricas de la tormenta	35
CAPÍTULO 3: Monitor de campos eléctricos Boltek EFM-100	36
3.1 Introducción	37
3.2 Funcionamiento	38
3.3 Interpretación de los datos obtenidos por el EFM-100	40
CAPÍTULO 4: Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México	44
4.1 Introducción	45
4.2 Historia del ORCCM	46
4.3 Funcionamiento del monitor de neutrones 6-NM64	48
CAPÍTULO 5: Análisis de datos y resultados	51
5.1 Introducción	52

5.1.1 Teoría de Dorman	52
5.2 Primer análisis de datos	54
5.2.1 Criterio para la primera selección de tormentas eléctricas	54
5.2.2 Resultados	55
5.3 Análisis de medias móviles para el conteo de RC	59
5.4 Análisis de regresión lineal	62
5.5 Porcentaje de variación con respecto a la media de la intensidad de RC en condiciones de buen tiempo	66
5.6 Análisis de épocas superpuestas	70
CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	78

INTRODUCCIÓN

En 1925, Wilson [1] introdujo por primera vez la idea de que, en caso de haber partículas cargadas presentes en la atmósfera, éstas serían posiblemente aceleradas por los campos eléctricos atmosféricos generados por tormentas. Siguiendo esta hipótesis, en 1930 Schonland realizó el primer experimento para detectar electrones acelerados bajo nubes tipo cumulonimbus; es decir, nubes de tormenta. Se encontró una disminución de 20-30% en la intensidad de los electrones detectados.

Diversos experimentos similares se llevaron a cabo en las siguientes décadas, sin embargo, fue hasta 1985, cuando Lidvansky et. al. [2] analizaron los datos registrados por un monitor de campos eléctricos atmosféricos, que se encontró una correlación del campo eléctrico producido por tormentas y la intensidad de rayos cósmicos. Además, demostraron que las variaciones no podían ser causadas por efectos de presión ni temperatura del ambiente. En la década de 1990 el problema ganó popularidad e incluso se desarrolló un modelo teórico que sustentara la idea original de Wilson.

A partir de la era espacial ha cobrado mucha importancia para la comunidad científica comprender la relación que existe entre la Tierra y el espacio que lo rodea. Se sabe que existen varios procesos llevados a cabo en la atmósfera superior de la Tierra que están regidos por la interacción con partículas que provienen del espacio exterior, conocidas como rayos cósmicos primarios. Una de las interacciones da lugar a un chubasco de partículas que constituyen la componente secundaria de los rayos cósmicos galácticos.

La desintegración de átomos atmosféricos a partir de la colisión con rayos cósmicos primarios produce tres componentes del chubasco atmosférico: nucleónica, electromagnética y dura o muónica [3]. La radiación cósmica secundaria (RC secundaria) incluye gamas, piones, muones, protones, electrones, partículas alfa, neutrones, nucleones y antipartículas.

La RC secundaria juega un papel importante en los procesos que se llevan a cabo en la atmósfera de la Tierra. De este modo, se estudian los efectos y el alcance que la atmósfera eléctricamente perturbada tiene sobre esta RC secundaria.

El objetivo principal de este trabajo es resolver la interrogante sobre la manera en que la presencia de un campo eléctrico producido por una tormenta eléctrica en la atmósfera de la Ciudad de México afecta la distribución y los registros de la componente nucleónica de la RC secundaria. Además, se busca caracterizar la intensidad de los campos eléctricos mencionados a partir de la cual el efecto se vuelve significativo.

Se pretende alcanzar el objetivo analizando cómo se refleja este efecto en la intensidad de rayos cósmicos registrada por el monitor de neutrones ubicado en el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORCCM). También se utilizarán los datos obtenidos por el monitor de campos eléctricos atmosféricos Boltek EFM-100, instalado en el Instituto de Geofísica de la UNAM, con el propósito de encontrar una correlación

entre el campo eléctrico atmosférico asociado a una tormenta eléctrica y la intensidad de rayos cósmicos registrada.

RESUMEN

En el capítulo 1 de este trabajo se explica lo que son los rayos cósmicos y sus propiedades físicas y químicas. También se describen los aspectos de la interacción que tienen con los campos electromagnéticos presentes en la heliosfera, el campo geomagnético y la atmósfera terrestre que pueden generar variaciones en su intensidad.

En el capítulo 2 se desarrolla todo el marco teórico concerniente a las tormentas eléctricas, siendo estas una parte fundamental de la presente tesis. Se ahondará en el proceso de formación de tormentas, cómo se distribuye la carga eléctrica dentro de una nube de tormenta y los campos eléctricos que se asocian a ella.

Dentro del capítulo 3 se encuentra una descripción del monitor Boltek EFM-100 y la teoría de operación del mismo. Además, se menciona cómo interpretar los datos obtenidos por el monitor y mostrados por el software del mismo, de manera que se puedan identificar con facilidad los días en que se desarrollen tormentas eléctricas.

Para el capítulo 4 se realizó una investigación del ORCCM. Se muestra la historia del mismo y el principio de funcionamiento del monitor de neutrones 6-NM64 que se encuentra en sus instalaciones. El registro de datos del monitor de neutrones será la base de este trabajo.

En el capítulo 5, como introducción y apoyo teórico para los análisis, se hace hincapié en el papel que tienen las tormentas eléctricas sobre la variación de la intensidad en la componente secundaria de la RC, con base en la teoría de Dorman. Además, se muestran los análisis de datos, el proceso de selección de los mismos y con ello, los resultados.

Finalmente se desarrollan las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos y el trabajo a futuro que puede surgir tomando como base esta tesis.

CAPÍTULO 1:

Rayos cósmicos

1.1 Introducción

En el desarrollo de este capítulo se comprenderá a fondo lo que son los rayos cósmicos y sus interacciones físicas con los campos presentes en el Sistema Solar. Se hará hincapié en la influencia de la magnetosfera y atmósfera terrestre, debido a la ubicación y principios de funcionamiento del monitor de neutrones 6-NM64 instalado en el ORCCM; tema que abarca el capítulo 4 del presente trabajo.

Los rayos cósmicos, también conocidos como radiación cósmica (RC) son, en su mayoría, núcleos de átomos ordinarios despojados de sus electrones como resultado de procesos de aceleración significativos. Debido a estos procesos, los rayos cósmicos son muy energéticos, con un rango de energía desde 10^6 eV hasta 10^{20} eV.

La RC llega constantemente a la Tierra y proviene de distintas fuentes en el Universo que se encuentran dentro y fuera de la Vía Láctea, incluyendo supernovas, hoyos negros, estrellas e incluso fuentes desconocidas. La RC se clasifica en primaria y secundaria a partir de su procedencia. La primaria es aquella que proviene directamente de una de las fuentes mencionadas, mientras que la secundaria es aquella que se genera a partir de la colisión de los rayos cósmicos primarios con otras partículas y/o elementos.

1.1.1 Abundancia relativa de cada elemento en la RC

Experimentos realizados con emulsiones nucleares y cámaras de niebla en globos a gran altura confirmaron que los rayos cósmicos consistían principalmente de protones. La composición química de la RC incluye hasta cierto grado todos los núcleos estables (ver figura 1) y un flujo constante de electrones que constituye menos del 2% de la abundancia total de rayos cósmicos. También, aunque son poco comunes, antiprotones y positrones. Es importante señalar que las abundancias de la RC sólo han podido determinarse hasta energías de alrededor de 10^{16} eV [4].

En la figura 1 se aprecia que el hidrógeno y el helio son los elementos dominantes en la RC galáctica, se estima que constituyen el 98% de los rayos cósmicos; sin embargo, no son tan abundantes con respecto a la abundancia en el Sistema Solar.

Elementos ligeros como el litio y el berilio son mucho más abundantes en la RC debido a un proceso conocido como *spallation*. Durante este proceso partículas primarias colisionan elásticamente con otras partículas, generando núcleos secundarios que tienen la misma velocidad de las partículas primarias. En este caso, el proceso de

spallation ocurre entre el gas interestelar y la RC primaria. Por ejemplo, si la RC está compuesta por C, N, y O tras haber spallation, se producen elementos como Li, Be, y B.

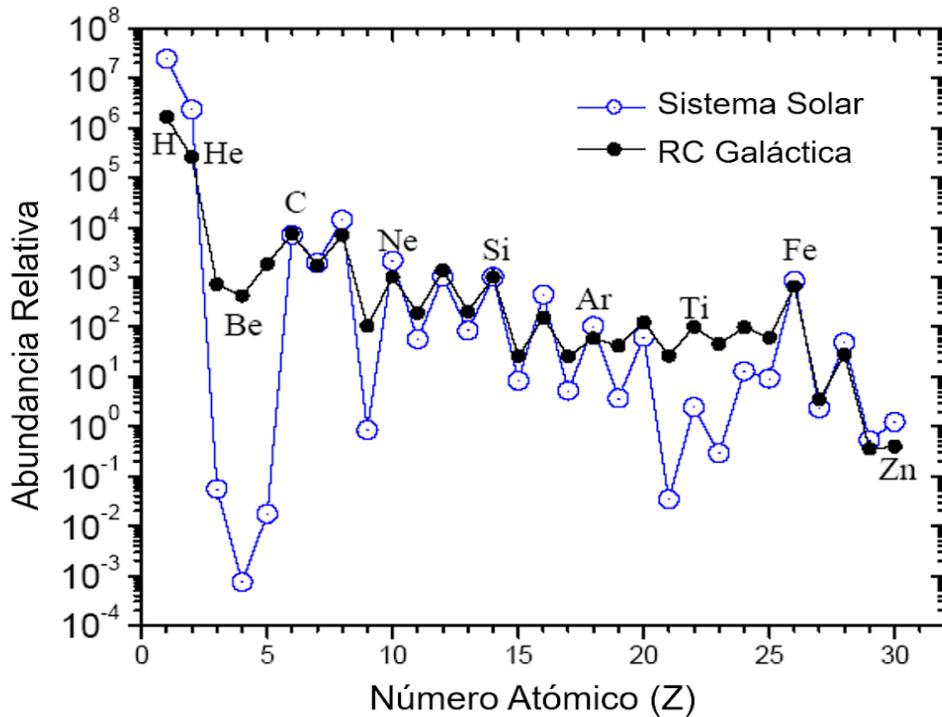


Figura 1. Gráfica de la abundancia relativa de los elementos en la RC galáctica con respecto a la abundancia en el Sistema Solar. Abundancia normalizada al Si=1000 en ambos casos. [5]

Por otro lado, las abundancias en la RC y el Sistema Solar para elementos comunes como el carbono, el nitrógeno y el magnesio son muy similares. Esta similitud es evidencia de que la composición química de la fuente de la cual provenga la RC y que debió acelerarse hace aproximadamente 10^7 años, es muy similar a la composición química de la nebulosa a partir de la cual se formó el Sistema Solar hace 4.6×10^9 años [5].

1.2 Espectro de energía de los rayos cósmicos

El espectro de energía de la RC representa el flujo de partículas por unidad de energía que llega a la Tierra y se puede observar en la figura 2. Los rayos cósmicos cubren 11 órdenes de magnitud en energía y en 1991, el rayo cósmico con la mayor energía registrada en la historia fue detectado por el Fly's Eye Cosmic Ray Detector de la Universidad de Utah. Esta energía es de 3.2×10^{20} eV.

Como primera aproximación, el flujo de rayos cósmicos se considera isotrópico cerca de la Tierra. Para partículas con energía menor a 10^{10} eV, el flujo está modulado por la actividad solar. Para energías mayores, se encuentra que el espectro muestra una relación potencial de la forma:

$$j(E) \simeq K \cdot E^{-\gamma},$$

donde K es constante y γ es el índice espectral, también constante. El índice espectral cambia con la energía y se supone que los cambios son debidos a efectos de propagación y producción de partículas a determinadas energías.

En la figura 2 se observa un cambio en la pendiente del espectro conocido como “rodilla” en un rango de $\gamma \sim 2.7$ a $\gamma \sim 3.1$ y con una energía de $\sim 10^{15.5}$ eV. También se ha observado una segunda discontinuidad en el espectro, llamada “segunda rodilla”, a energías entre $10^{17.6}$ – $10^{17.8}$ eV, donde el índice cambia a $\gamma \sim 3.3$. Por otro lado, a mayores energías, $\sim 10^{18.4}$ eV, el espectro se aplana nuevamente a $\gamma \sim 2.7$, en el llamado “tobillo” [6].

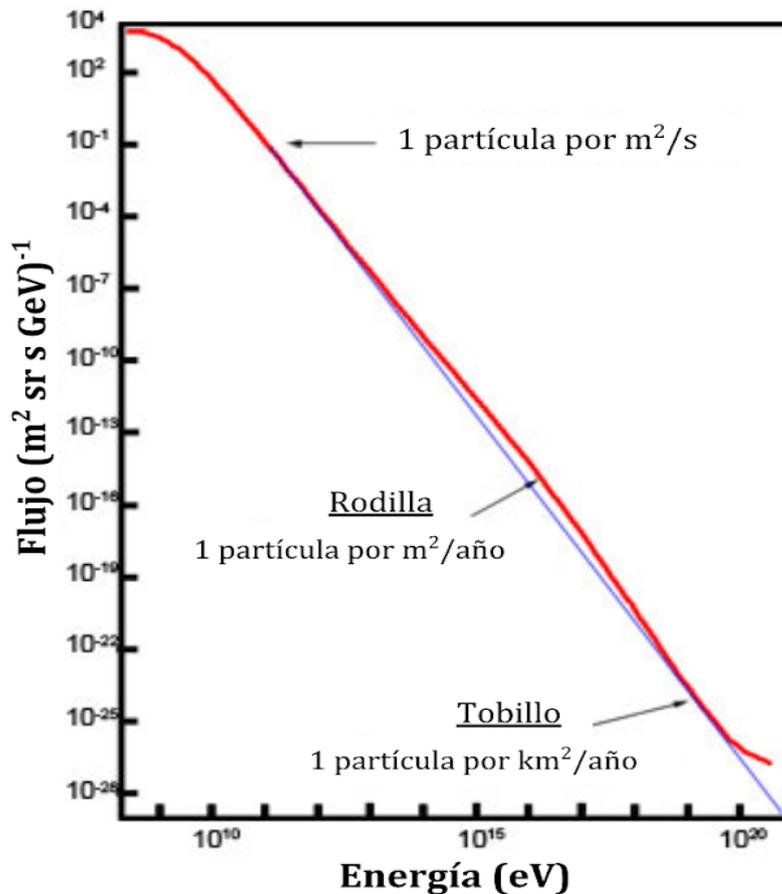


Figura 2. Espectro de energía de los rayos cósmicos. En azul el cálculo teórico del espectro, en rojo los rayos cósmicos detectados [7].

Se han planteado muchas explicaciones para describir el origen de los rayos cósmicos con energía mayor a la rodilla y reproducir las características observadas en el espectro. Una de estas explicaciones es el modelo de transición, el cual predice la existencia de otras fuentes de aceleración además de remanentes de supernova, como supernovas Tipo II o Gamma-ray bursts. Se postula que estos eventos ocurren con una frecuencia lo suficientemente alta como para crear partículas con energías que alcanzan el tobillo, donde el flujo de partículas extragalácticas comienza a dominar. Otros modelos aseguran que la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos ocurre en la segunda rodilla y que el tobillo es el resultado de producción de pares $e^+ e^-$ debida a un espectro dominado por protones, que interactúan con la radiación cósmica de fondo.

La radiación cósmica de fondo es la radiación electromagnética más antigua en el Universo y es considerada como la mayor evidencia de la teoría del Big Bang. Previo a la formación de estrellas, el Universo era denso y muy caliente, conformado por plasma

de hidrógeno. Al irse expandiendo, el Universo se fue enfriando hasta que los protones y electrones se unieron formando átomos neutros de H. Entonces, los fotones comenzaron a propagarse libremente por el espacio, sin ser dispersos por los protones y electrones que previamente se encontraban libres en el plasma. Estos fotones se han propagado desde esa época, volviéndose menos energéticos con el paso del tiempo y constituyendo la fuente de la radiación cósmica de fondo.

La radiación cósmica de fondo se detecta con radiotelescopios muy sensibles como una señal débil, sin embargo, presente en todo el espacio. Fue descubierta accidentalmente en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson.

La discriminación entre los modelos del origen de los rayos cósmicos sería posible si se pudiera determinar con exactitud la composición de la RC, dado que el cambio de la masa promedio en el tobillo es diferente para cada modelo. Si el modelo de transición es correcto, se espera que la composición a energías menores al tobillo esté dominada por hierro. Si el tobillo es debido a la producción de pares a partir de la interacción con la RC de fondo, se espera un flujo dominado por protones.

1.3 Modulación de rayos cósmicos debida al Sol

Idealmente, la detección de rayos cósmicos galácticos y extragalácticos debería realizarse fuera del Sistema Solar, sin embargo esto aún no es posible. Por este motivo se deben tomar en cuenta los efectos que tiene la influencia del Sol sobre la intensidad de la RC que se detecta por satélites que orbitan la Tierra. Estos efectos se deben a las irregularidades magnéticas provocadas por un flujo turbulento de viento solar provocado por fenómenos solares en diferentes escalas de tiempo.

Las variaciones de la RC fuera de la magnetosfera de la Tierra son periódicas y esporádicas. Periódicas son las variaciones diurnas de la intensidad de los rayos cósmicos y el efecto de la modulación del ciclo solar, ambas relacionadas directamente con la actividad solar. Variaciones esporádicas son los decrecimientos Forbush y los decrecimientos en la intensidad de los RC debidos a nubes magnéticas. Las variaciones de 27 días son una combinación de efectos periódicos (rotación solar) y esporádicos (flujo de larga duración del viento solar rápido).

1.3.1 La variación de 11 años

Los núcleos cargados de la radiación cósmica que llegan al Sistema Solar deben sobrepasar el campo magnético que viene acarreado por el viento solar y penetrar así la heliosfera para poder llegar a la Tierra. El viento solar es el material que constantemente es expulsado desde la corona del Sol. Cuando la actividad solar es máxima, evidentemente el flujo de viento solar es mayor. Por esta razón, la amplitud de la modulación de rayos cósmicos depende del nivel de actividad del Sol. Esto origina una variación cíclica de 11 años, misma duración del ciclo solar.

El ciclo solar, también conocido como ciclo de manchas solares, es el cambio periódico promedio de 11 años en la actividad y la apariencia del Sol. El ciclo solar parte del mínimo de actividad y alcanza el máximo aproximadamente cada 5 años y medio. Además, el ciclo solar ha sido registrado a través de siglos debido al conteo de manchas solares que realizaron varios astrónomos. Sin embargo, los registros confiables datan desde el siglo XVII. El ciclo que se desarrolló en los años 1755–1766 se considera el número 1, por ende, actualmente se desarrolla el ciclo 24. El ciclo solar 24 comenzó el 4 de enero del 2008 y durante el año 2017 se encontró muy próximo al mínimo. Se predice que el mínimo solar será a finales del 2018 o principios del 2019.

Las manchas solares se definen como regiones del Sol más oscuras y de menor temperatura que el área que las rodea. Las manchas solares son la manifestación de un flujo de campo magnético muy intenso (aproximadamente 10^3 G) y normalmente aparecen en pares con polaridad opuesta.

El número de manchas solares es el parámetro que define al ciclo solar. Cuando hay un máximo incrementan las regiones activas del Sol y a su vez, el número de manchas solares. En la figura 3 claramente se observa una anti-correlación, que al aumentar el número de manchas solares, la intensidad de RC decrece y viceversa. La reducción total en la RC oscila alrededor del 20%. Para la figura 3 se utilizaron los datos del monitor de neutrones de Moscú, Rusia debido a que se pueden tomar con una resolución de años y su registro abarca varias décadas.

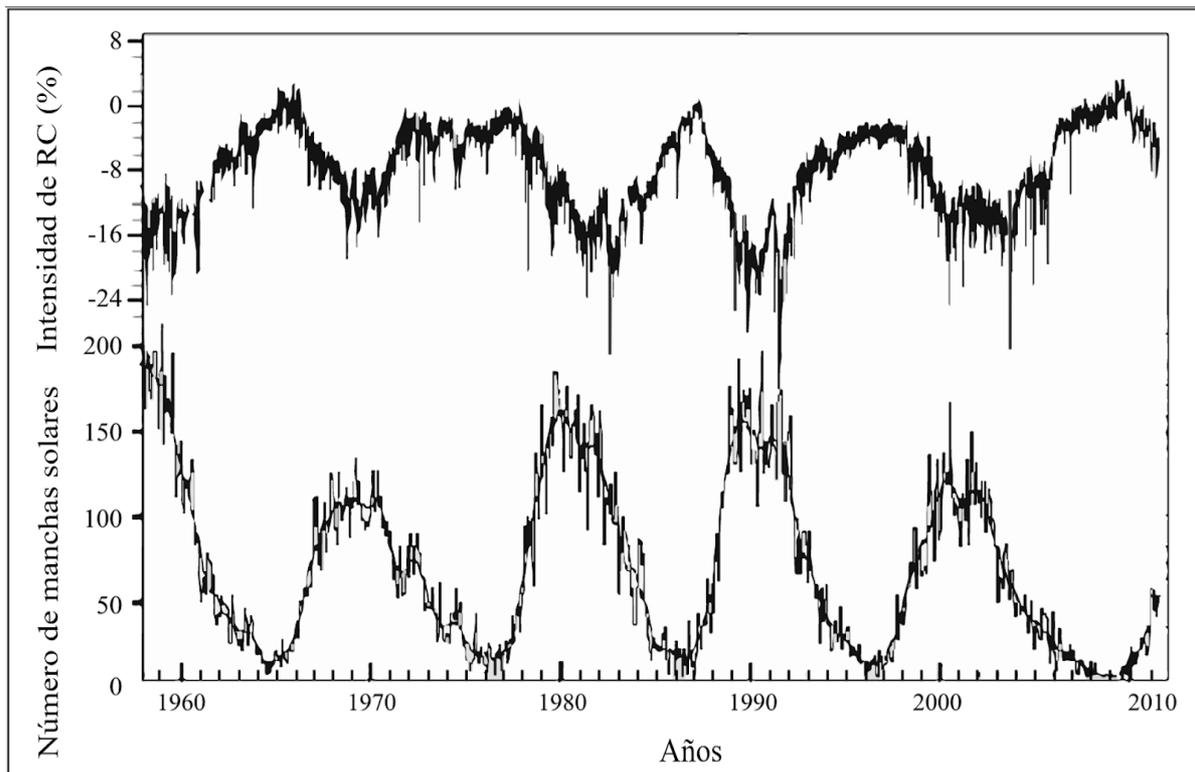


Figura 3. Variación en la intensidad de la radiación cósmica (panel superior) de 1958 a 2010 detectada en el monitor de Moscú, Rusia (<http://cr0.izmiran.ru/mosc/>), junto con el ciclo de manchas solares (panel inferior) para el mismo periodo [8].

El ciclo de manchas solares es también la mitad del ciclo magnético del Sol. Cada vez que el número de manchas solares aumenta y disminuye, el campo magnético del Sol invierte su polaridad. De este modo, la fuente de las líneas de campo magnético pasa de ser el polo norte del Sol al polo sur, mientras que el sumidero pasa del polo sur al norte, o viceversa.

En la figura 3 se observa una característica importante asociada a la intensidad de rayos cósmicos durante los ciclos de actividad solar. El primer y el tercer máximo en la gráfica de variaciones de rayos cósmicos se presentan como un gran pico, mientras que el segundo y cuarto máximos se presentan como una meseta. Esto se debe al ciclo magnético del Sol de 22 años. Cuando la polaridad es Norte-Sur las partículas cósmicas penetran la heliosfera preferentemente por los polos solares, mientras que con la polaridad Sur-Norte las partículas penetran preferentemente por la zona ecuatorial. La forma en que la RC ingresa a la heliosfera produce estas diferencias en la forma de los máximos de intensidad.

1.3.2 El decrecimiento Forbush

El decrecimiento Forbush es una caída significativa y súbita en la intensidad de rayos cósmicos galácticos. En cuestión de horas, la intensidad registrada en una estación particular puede verse reducida desde un 3% hasta en 30%; dependiendo de la latitud en donde se encuentre la estación. Después de llegar a un mínimo, la intensidad comienza a recuperarse lentamente; lo cual puede durar desde días hasta semanas. El decrecimiento Forbush fue nombrado en honor a su descubridor, Scott E. Forbush, quien en 1937 observó por primera vez este fenómeno físico.

En la figura 4 se aprecia un decrecimiento Forbush, cuya presencia es observada simultáneamente en todo el mundo. En el caso del registro del 6-NM64 instalado en Ciudad Universitaria, el decrecimiento alcanzó casi el 4% de intensidad y tardó aproximadamente cuatro días en recuperarse la intensidad normal.

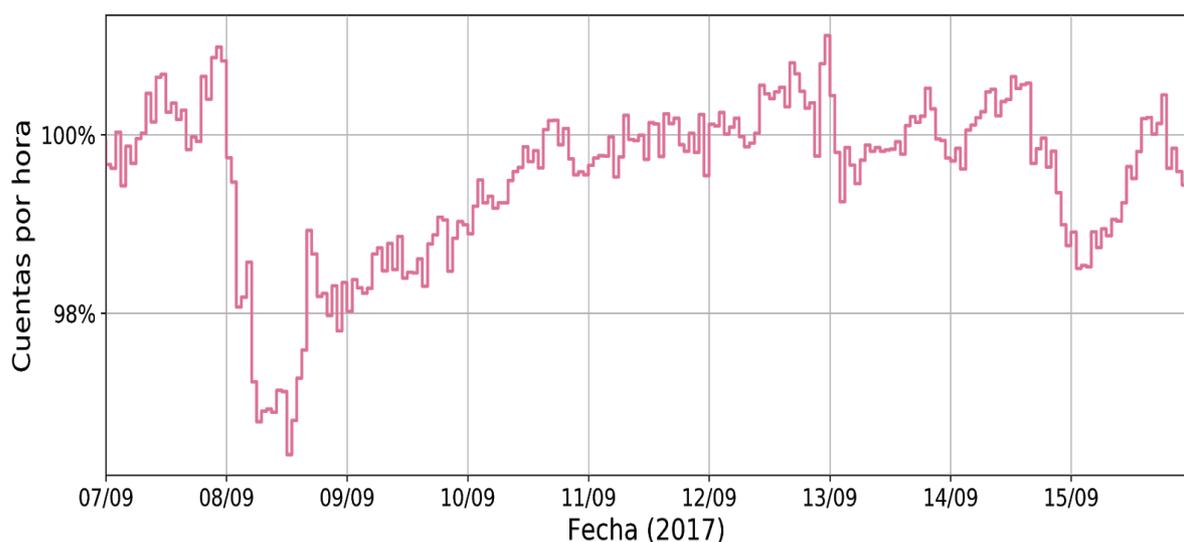


Figura 4. Decrecimiento Forbush registrado en septiembre del 2017 por el monitor de neutrones (6-NM64) del ORCCM. Normalizado al promedio de los datos en tiempos quietos.

La mayoría de los estudios han concluido que la causa de estos decrecimientos son las ondas de choque generadas por las eyecciones de masa coronal de altas velocidades; las cuales actúan como un escudo o barrera magnética al paso de los rayos cósmicos. Además, las ondas de choque colectan partículas en su frente, ocasionando un pequeño incremento que se registra en los detectores justo antes de un decrecimiento Forbush [8].

1.3.3 La variación diurna

La variación diurna es una variación sinusoidal de la intensidad de RC producida por la interacción de las partículas con el campo magnético interplanetario (CMI) y la convección de este campo debida al viento solar. El CMI no es homogéneo y por ello modifica la trayectoria originalmente helicoidal de los rayos cósmicos. Las fluctuaciones del CMI de escalas cercanas al radio de giro de las partículas provocan un fenómeno que se denomina dispersión resonante y ocurre en todas direcciones con la misma probabilidad. Al efecto conjunto de la dispersión de muchas partículas se le conoce como difusión y ésta sigue la dirección principal de la espiral de Arquímedes que forma el CMI. Debido a estos procesos significativos de convección y difusión, los rayos cósmicos constantemente están en competencia por moverse hacia dentro y hacia afuera de la heliosfera.

En la figura 5 se observa que el flujo neto de rayos cósmicos apunta desde una dirección cercana a las 18 horas, por lo que un detector registrará un máximo en la intensidad de RC alrededor de esa hora (tiempo local). Unas 12 horas antes, el detector apuntaría en la dirección opuesta por lo que la intensidad será mínima. La transición entre estos máximos y mínimos generarán la variación sinusoidal diurna.

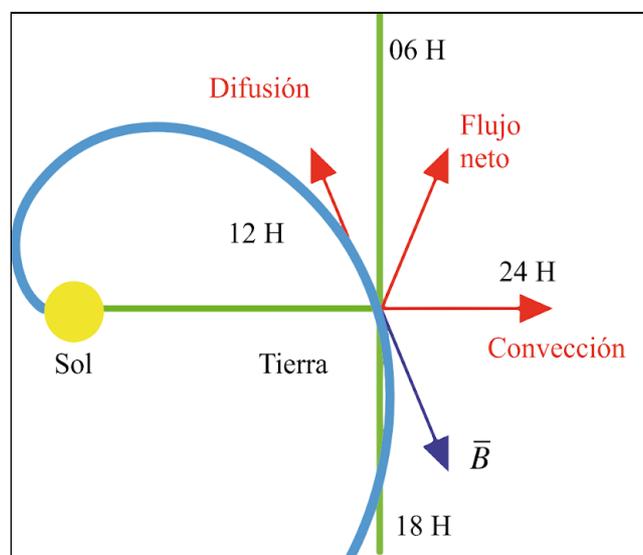


Figura 5. Representación esquemática de la variación diurna de la RC como flujo resultante de la suma de los procesos de convección y difusión [8]. Siendo B la dirección del CMI.

1.4 Efectos del campo geomagnético sobre la intensidad de rayos cósmicos

Resulta ser de suma importancia detectar la RC y analizar el flujo de partículas que se ubican en cada parte del espectro de energía. Para interpretar cualquier medición de la intensidad de la radiación cósmica que se realice cerca de la superficie terrestre se requiere tomar en cuenta la presencia del campo geomagnético.

La presencia del campo geomagnético provoca que los rayos cósmicos provenientes del exterior sean desviados de su trayectoria original, dificultando la entrada directa de los mismos hasta la atmósfera terrestre.

1.4.1 La rigidez umbral

El campo magnético terrestre puede aproximarse a un dipolo, sin embargo se encuentra deformado por el viento solar. Con la configuración actual, las líneas de campo emergen del polo norte y llegan al polo sur. Por la concentración de líneas de campo en los polos, el campo geomagnético tiene una mayor intensidad en esas regiones y por ende, la menor intensidad en el ecuador.

La rigidez umbral es la energía mínima que una partícula cargada requiere para alcanzar la atmósfera terrestre en diferentes latitudes de la Tierra. Debido a la estructura del campo magnético terrestre, la rigidez umbral será menor en los polos. Para llegar a latitudes cercanas al ecuador, una partícula requerirá mucha más energía para no ser capturada por las líneas de campo geomagnético y llevada al polo sur.

Por ejemplo, para llegar a la latitud donde se encuentra la Ciudad de México, los rayos cósmicos deberán tener una energía de 8.23 GeV. Esta es la rigidez umbral de la ciudad. Para el ecuador la rigidez umbral es de 15 GeV y las partículas que excedan 60 GeV pueden penetrar a la Tierra desde cualquier dirección [9].

1.5 Chubascos atmosféricos

Una vez que los rayos cósmicos alcanzan la atmósfera terrestre, sufren colisiones con los átomos del aire. Estas colisiones pueden ser directamente con el núcleo de otro átomo o con su estructura electrónica. Si la partícula cósmica choca con la estructura electrónica de otro átomo, generalmente va a provocar que uno de sus electrones sea liberado; proceso conocido como ionización. Las colisiones de este tipo tienen un efecto despreciable sobre la partícula cósmica primaria y también son las más frecuentes.

Por otro lado, las colisiones nucleares provocan la desintegración del núcleo atómico que se encontraba en la atmósfera, comúnmente de nitrógeno u oxígeno. Este tipo de colisiones son las que generan lo que se conoce como chubasco atmosférico, el cual conforma la componente secundaria de la RC. Un chubasco atmosférico (figura 6) es una “cascada” de partículas producto de la interacción nuclear de la RC cósmica primaria al llegar a la atmósfera terrestre. Los chubascos atmosféricos tienen tres componentes: suave o electromagnética, dura o muónica y la nucleónica o hadrónica. Dependiendo de la energía que trae la partícula primaria, predomina una de estas tres componentes.

- Componente electromagnética.- Consiste de electrones, positrones y fotones; partículas producidas por el decaimiento de piones neutros. Los piones neutros y cargados son los principales productos de la colisión nuclear inicial. Los piones son mesones, partículas capaces de interactuar fuertemente.
- Componente muónica.- Consiste de muones; partículas producidas por el decaimiento de piones cargados que conservan la misma carga del pión inicial. Los muones son leptones, partículas con interacciones débiles.
- Componente nucleónica.- Consiste de núcleos, protones, neutrones y kaones producidos por *spallation*.

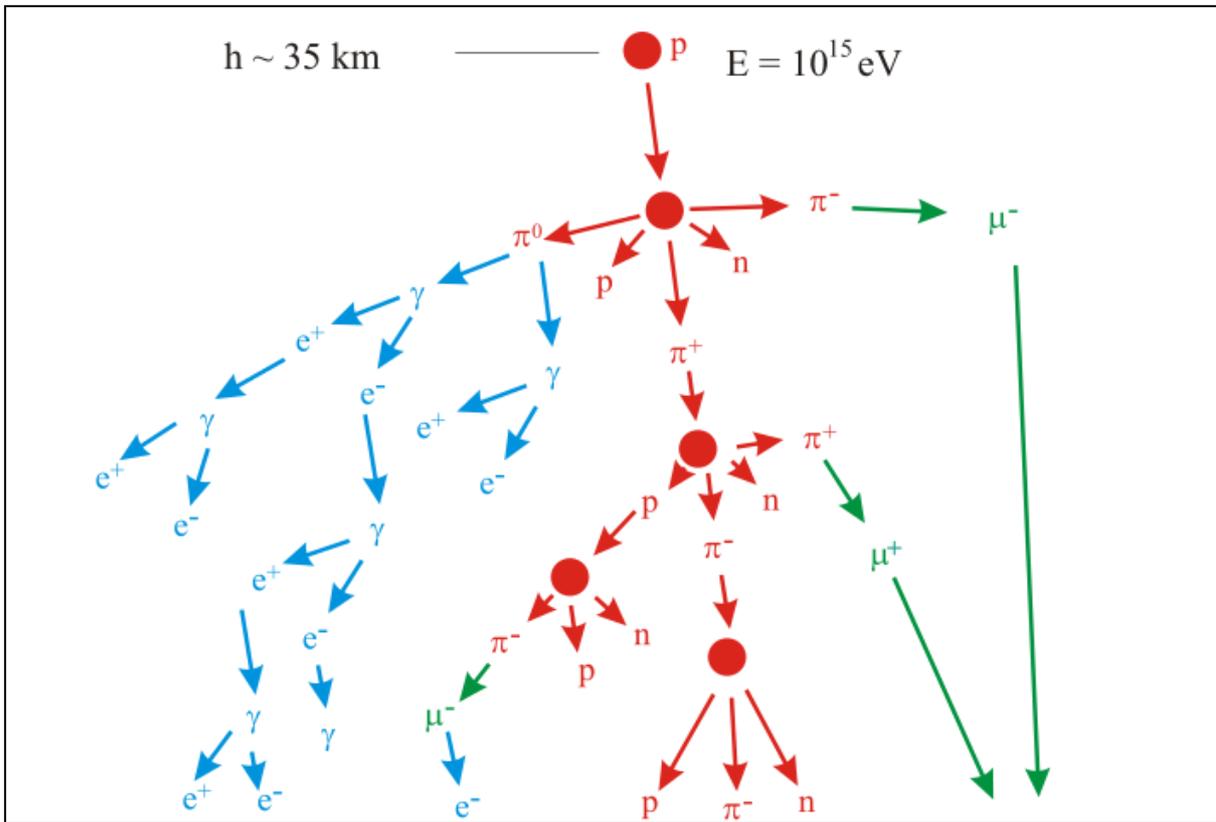


Figura 6. Esquema de un chubasco atmosférico. Color azul representa componente suave, rojo componente hadrónica y verde componente dura.

Los chubascos atmosféricos fueron descubiertos por Bruno Rossi en 1934 y pueden tener una extensión de hasta varias decenas de kilómetros que se atribuye a las energías tan grandes de los rayos cósmicos primarios. Como se observa en la figura 6, la componente electromagnética es la más abundante para altas energías ($E = 10^{15}$ eV) y la componente nucleónica es la menos abundante.

Dentro de la componente nucleónica, los neutrones supratermales son una parte significativa. Estos neutrones se pueden detectar a nivel tierra con los detectores conocidos como monitores de neutrones, los cuales se describirán a profundidad en el capítulo cuatro de esta tesis.

Un aspecto muy importante para las partículas que componen a los chubascos atmosféricos es el cambio en la intensidad con respecto a la profundidad atmosférica que vayan penetrando. En la figura 7 se observa precisamente esta relación.

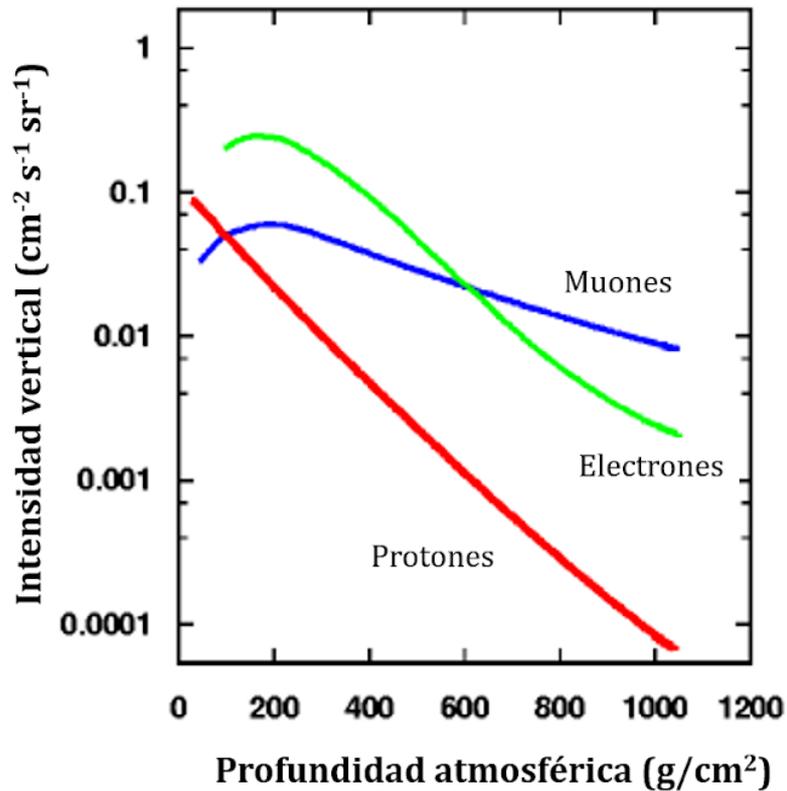


Figura 7. Gráfica representativa de la relación entre la intensidad de las componentes del chubasco atmosférico y la profundidad atmosférica. Se considera como nivel del mar 1000 g/cm².

En la figura 7 se aprecia que mientras alcancen una mayor profundidad atmosférica, los protones y neutrones; representados por la curva color rojo, disminuyen su intensidad rápidamente. Mientras que los muones, representados por la curva color azul, sufren una disminución en la intensidad muy pequeña. Cabe recalcar que la CDMX se encuentra a una profundidad atmosférica de 790 g/cm².

La cantidad de muones es muy significativa para este trabajo, debido a que cierto porcentaje de los pulsos registrados por los monitores de neutrones 6-NM64 se debe a muones negativos. El proceso se describirá en el capítulo 4.

CAPÍTULO 2:

Tormentas eléctricas

2.1 Introducción

Las tormentas eléctricas y los procesos físicos que llevan a la producción de campos eléctricos atmosféricos son de suma importancia para este trabajo. Constituyen la base para la selección de datos registrados por el monitor Boltek EFM-100. El presente capítulo describirá con detalle la producción de campos eléctricos atmosféricos debida a las nubes de tormenta, cuyas propiedades físicas también serán mencionadas.

Una tormenta eléctrica se define como una nube tipo cumulonimbus capaz de producir descargas eléctricas, comúnmente conocidas como rayos. Los rayos siempre generan una emisión acústica conocida como trueno. Las tormentas eléctricas generalmente van acompañadas de precipitación y fuertes vientos; incluso pueden producir tornados. Además, se desarrollan en la capa de la atmósfera terrestre conocida como troposfera, incluso pueden alcanzar la base de la estratosfera. La figura 8 muestra una fotografía de la típica tormenta eléctrica.



Figura 8. Tormenta eléctrica en Buck Island Ranch, Highlands County, Florida. Fotografía de Joe Guthrie [10].

Se han realizado varias clasificaciones para determinar tipos de tormenta. En 1977 se definió como tormenta eléctrica ordinaria a aquella que pasa por las tres etapas de desarrollo en un periodo de 45-60 minutos, con una fase madura que dura entre 15-30 minutos. Además, se han definido las tormentas multicelda y las superceldas. Las multiceldas son aquellas típicamente formadas por 2 o 4 celdas en diferentes etapas de

desarrollo. Las superceldas tienen aproximadamente el mismo tamaño que las multiceldas, sin embargo, su dinámica está regida por la circulación de una corriente de aire ascendente muy intensa y de gran escala que coexiste con otra circulación descendente por periodos de 30 minutos o más. Después de haber transcurrido este tiempo, las superceldas se disipan debido a su gran tamaño e intensidad. En algunos casos las tormentas multicelda evolucionan en superceldas [11].

2.2 Formación de tormentas eléctricas

En esta sección se describirán la estructura y la dinámica de una sola nube tipo cumulonimbus aislada, conocida como celda, por ser el tipo de tormenta que se presenta con más frecuencia en el planeta. La mayoría de estas nubes contienen hielo en la parte superior, sin embargo, también es posible que una nube cumuliforme sin hielo se precipite y se convierta en cumulonimbus; proceso que ocurre comúnmente en los trópicos.

La estructura básica de una nube de tormenta es en forma de yunque y tiene un desarrollo que se describe en tres etapas: fase de cúmulo, fase de madurez y fase de disipación. Estas etapas se describirán a continuación y se pueden observar esquemáticamente en la figura 9.

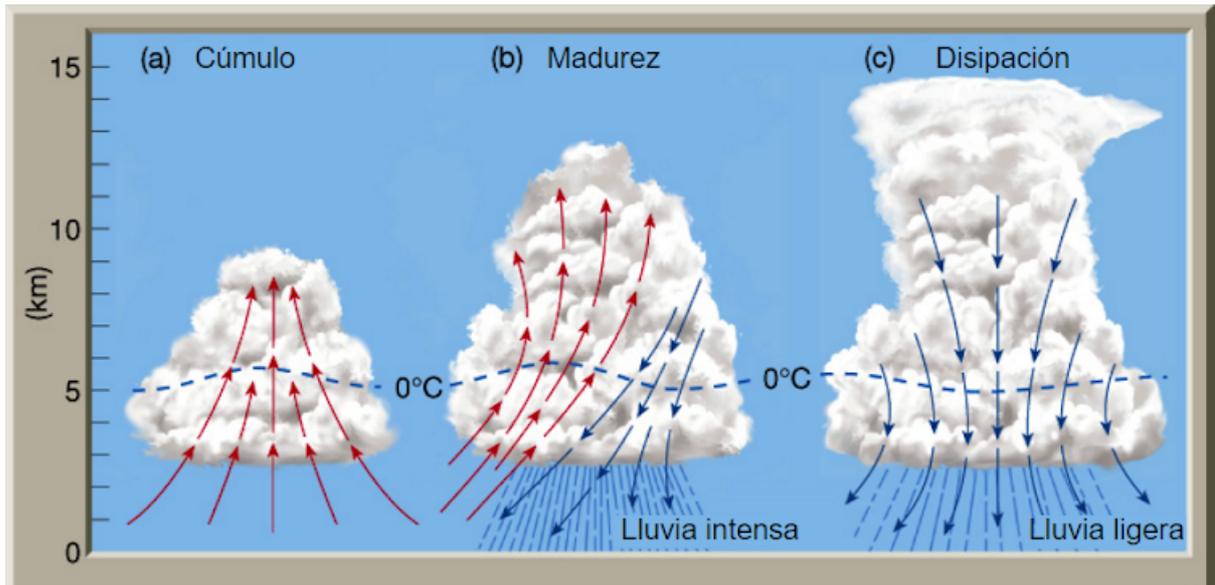


Figura 9. Esquema ilustrativo de las fases de desarrollo de una nube tipo cumulonimbus, con referencia gráfica de su respectiva altura. (a) Fase cumulus o de formación de una nube de tormenta; (b) Fase de madurez; (c) Fase de disipación.

2.2.1 Fase de cúmulo

En la fase cumulus se forman torres de nube debido a corrientes de aire ascendentes. La intensidad de la tormenta será determinada por la fuerza ejercida por estas corrientes, cuyas altas velocidades propician que exista una tasa de condensación elevada. Al elevarse, el aire cálido y húmedo se comienza a enfriar, y el vapor de agua que contiene se condensa. En caso de que haya algún núcleo, es decir, una partícula sólida alrededor de la cual el agua se pueda cristalizar, se formarán copos de nieve.

Los bordes de la nube durante esta fase son definidos y distinguibles, indicando que la nube está compuesta principalmente de gotas de agua. La nube convectiva continúa creciendo verticalmente, hasta sobrepasar la altura de congelación donde la temperatura es de 0°C, que se puede observar en la figura 9. Mientras que algunas gotas de agua se congelan, otras moléculas de agua son depositadas sobre núcleos de condensación, formando de esta manera cristales de hielo [12].

2.2.2 Fase de madurez

Durante esta fase, los copos de nieve formados en la fase cumulus seguirán siendo arrastrados por las corrientes de aire ascendentes. Es aquí donde la tormenta se considera madura. Los cristales en esta zona rápidamente se aglomerarán en grandes partículas de hielo. Una vez que esto sucede, las corrientes de aire ascendentes no serán capaces de soportar el peso del hielo, y éste caerá, arrastrando el aire a su alrededor hacia abajo. Es entonces que las corrientes de aire se vuelven descendentes y comienza a haber precipitación. La lluvia se genera por la fundición de algunas partículas de hielo, debida al incremento de temperatura que experimentan al caer. Las descargas eléctricas entre la nube y la tierra, llamadas NT, comienzan a suceder en este momento, sin embargo, el proceso se describirá concretamente en la sección 2.3.2.3. La nube cumulonimbus alcanzará su máxima altura, en la base de la estratosfera, donde la corriente ascendente se volverá inestable, extendiéndose lateralmente y formando así la forma característica de yunque.

2.2.3 Fase de disipación

Durante esta fase la corriente descendente principal se ve fortalecida por la penetración de aire frío desde la parte superior de la nube. La temperatura de la nube disminuye debido a este proceso, aunado con la gran cantidad de partículas de hielo y nieve que contiene. Esta disminución en la temperatura provoca que las gotas de agua que previamente alcanzaron un sobreenfriamiento sin congelarse, por fin se congelen y liberen de esa manera calor latente. Debido a eso, la corriente descendente se debilita y la nube comienza a disiparse desde la parte superior. La disipación de la cumulonimbus también puede ocurrir en el caso de que la precipitación sea tan intensa que la corriente de aire ascendente no sea capaz de soportarla y por ende, cese, provocando la evaporación de la nube.

2.3 Producción de campos eléctricos atmosféricos

En 1752 Le Monnier demostró que la atmósfera se encuentra electrificada y en 1795 Coulomb descubrió que el aire era un fluido conductor débil. Estos descubrimientos propiciaron la generación de nuevas dudas para la comunidad científica que se resolvieron hasta 1920, cuando Wilson propuso por primera vez que las tormentas eléctricas alrededor del mundo funcionan como cargadores de un capacitor, cargando negativamente el suelo y positivamente la atmósfera superior. Si no existiera una fuente que cargara el suelo, este se descargaría en tan solo 10-30 min. Se estima que entre 600 y 1000 tormentas simultáneas alrededor del mundo mantienen el suelo cargado negativamente [13].

La distribución de carga descrita por Wilson es la que prevalece en condiciones climáticas estables y produce un campo eléctrico atmosférico que se explica en la sección 2.3.1.

Un campo eléctrico puede definirse en términos simples como una región en el espacio cuyas propiedades han sido modificadas por la presencia de una carga eléctrica puntual o continua, de tal modo que, al introducir en dicho campo una nueva carga eléctrica, ésta experimentará una fuerza. En el caso de la atmósfera, las cargas eléctricas se encuentran en el suelo y la ionósfera y producen lo que se conoce como campo eléctrico atmosférico. Sin embargo, este campo atmosférico es variable en condiciones de tormenta, debido a que las nubes de tormenta desarrollan una distribución de cargas eléctricas que tienen un efecto en la electricidad general de la atmósfera.

La variabilidad del campo eléctrico atmosférico genera a su vez un circuito eléctrico global entre la ionósfera, la superficie terrestre, la atmósfera inferior y las tormentas eléctricas. En la figura 10, se observa un esquema ilustrativo del Circuito Eléctrico Global.

La idea de este Circuito Eléctrico Global fue aceptada rápidamente por la comunidad científica después de que en 1923, Mauchly analizó datos obtenidos en todo el mundo del campo eléctrico atmosférico en condiciones climáticas estables y encontró que había un pico en la intensidad alrededor de las 19:00 h UT. Fue en 1936 que Whipple y Scrase determinaron que, como las tormentas eléctricas ocurren más frecuentemente sobre tierra durante la tarde en tiempo local, el pico encontrado por Mauchly se debía a que a esa hora había más tierra que océanos en el mundo y esa tierra estaba durante la tarde en tiempo local. En contraste, a las 04:00 h UT, cuando el océano Pacífico se encuentra en la tarde, el circuito global se encuentra en un mínimo.

Otro aspecto que mantiene el Circuito Eléctrico Global activo es la creación constante de iones en la atmósfera, de otro modo, la diferencia de potencial entre ambas placas del capacitor; es decir, la tierra y la ionósfera, sería suficiente para descargarlas. La fuente de estos iones son las colisiones de los rayos cósmicos galácticos con partículas de la atmósfera. Estas colisiones producen la componente secundaria de los rayos cósmicos. Parte de esta RC secundaria se une con moléculas en el aire, transfiriéndoles así carga eléctrica. Estos iones residuales son los que le brindan conductividad a la atmósfera a partir de 1 km de altura. A menor altura, los iones son proporcionados por el decaimiento radioactivo de los gases que emanan naturalmente del suelo como el ^{222}Rn [14].



Figura 10. Esquema ilustrativo del Circuito Eléctrico Global. Recuperado de [14].

Tomando en cuenta el propósito de este trabajo, a continuación se hará un enfoque en la descripción de lo que sucede cuando hay buen tiempo y lo que sucede en condiciones de tormenta.

2.3.1 Condiciones de buen tiempo

Cuando la atmósfera se encuentra sin perturbaciones climáticas importantes y menos de 4/10 del cielo está cubierto por nubes, existe un campo eléctrico en dirección vertical que apunta al suelo y tiene una magnitud promedio de: $E_0 \sim 120 \text{ V/m}$ [15].

Este campo es producido por la distribución de carga entre el suelo y la atmósfera superior. Cabe recalcar que el valor de la magnitud del campo eléctrico atmosférico decrece rápidamente con la altitud.

2.3.2 Condiciones de tormenta

La distribución de carga eléctrica típica en una nube de tormenta comprende la parte superior de la nube con carga neta positiva y la parte inferior con carga negativa, excepto cuando la precipitación sea muy intensa. En ese caso, la zona intermedia de la nube tendrá carga negativa, donde la temperatura es de aproximadamente $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Los extremos superior e inferior de la nube tendrán carga positiva.

En la figura 11 se muestra un esquema de la distribución de carga dentro de una cumulonimbus y debajo de ella, en dos de sus etapas de desarrollo. Las alturas donde se observa la mayor concentración de carga en la figura son los valores promedio de una tormenta eléctrica de una sola celda aislada. Estas alturas están directamente correlacionadas con la velocidad local de las corrientes de aire ascendentes. Por ejemplo, la región con carga negativa en una supercelda asciende hasta los 9 km [14].

Además, en la figura 11 se observa una delgada capa de carga negativa en la parte superior de la nube con forma de yunque, la cual se produce cuando los iones negativos presentes en la atmósfera son atraídos a la región de la nube cargada positivamente. Este efecto de apantallamiento también ocurre debajo de la nube, sin embargo, es mucho menor debido a las corrientes de aire ascendentes y a que los iones son menos móviles a menores altitudes.

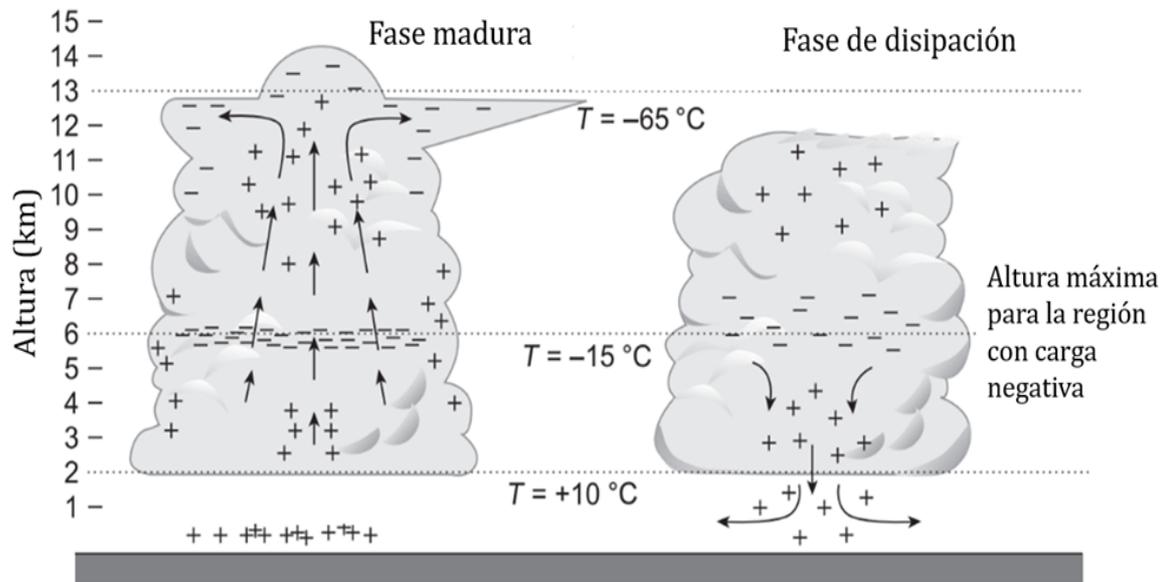


Figura 11. Esquema ilustrativo de las distribuciones de carga eléctrica dentro de una nube cumulonimbus para dos de sus etapas de desarrollo, con la referencia gráfica de su altura. Los signos positivos y negativos indican la polaridad de la carga, las flechas indican la dirección de los flujos de aire. Recuperada de [12].

2.3.2.1 Proceso de electrificación de una nube de tormenta

Existen dos hipótesis que explican cómo se produce la separación de cargas en una nube de tormenta: la hipótesis de convección y la de precipitación. Aún no se comprende de qué manera y bajo qué condiciones prevalece una sobre otra o cómo encajan juntas.

Con el objetivo de comprender ambas hipótesis, primero se debe detallar el proceso por el cual las partículas de hielo adquieren una carga eléctrica. El hielo en las nubes se puede formar de dos maneras: por la condensación de vapor de agua alrededor de un núcleo, o por la acreción de gotas sobreenfriadas. Las gotas sobreenfriadas son aquellas que, a pesar de encontrarse a 0°C , no se congelan debido a la tensión superficial. Estas gotas se van acreciendo hasta formar granizo con propiedades físicas superficiales muy diferentes al otro tipo de hielo formado a partir de la condensación. Colisiones entre las partículas de este granizo y cristales de hielo más pequeños, en presencia de vapor de agua y a una temperatura conocida como temperatura de

inversión de carga, entre -10°C y -20°C , resultan en la transferencia de carga eléctrica negativa al granizo. Si la temperatura es mayor, la transferencia será de carga positiva.

La hipótesis de precipitación establece que en la región de la nube que está a 6 km de altura; donde la temperatura es de -15°C (ver figura 11), las partículas de granizo adquieren una carga negativa por el proceso previamente mencionado y dejan atrás cristales de hielo con carga positiva. Estos cristales pequeños no son lo suficientemente pesados como para descender y se quedan en la parte superior de la nube, mientras que la zona bajo esa región se encuentra cargada negativamente por la presencia del granizo. Sin embargo, por su peso, varias partículas de granizo seguirán descendiendo y comenzarán a cargarse positivamente una vez que la temperatura sobrepase los -10°C y las colisiones con otras partículas les transfieran carga positiva.

La hipótesis de convección plantea que la región superior de la nube tiene una carga neta positiva debido a que los cristales de hielo; las partículas más ligeras y movibles que están cargadas positivamente, son arrastrados hacia arriba por las corrientes de aire ascendentes. De esta manera, quedan las cargas negativas en la parte inferior de la nube.

2.3.2.2 Campos eléctricos producidos por una nube cumulonimbus

La distribución de carga representada gráficamente en la figura 11 da lugar a un campo eléctrico sobre la nube que apunta hacia arriba en dirección a la atmósfera superior. Bajo la nube también hay un campo eléctrico que apunta hacia arriba en dirección a la región negativa de la nube.

Dentro de la cumulonimbus también se produce un campo eléctrico cuyo valor absoluto es bastante difícil de medir debido a que se requiere de aeronaves o globos que cuenten con los instrumentos necesarios. Sin embargo, se han logrado caracterizar eléctricamente las superceldas aisladas, las multiceldas y las tormentas pequeñas sobre el Laboratorio Langmuir en Nuevo México.

En 1998, Stolzenburg et al analizaron 20 tormentas con globos que atravesaban las nubes dentro de la corriente de aire ascendente principal y eran capaces de medir la magnitud del campo eléctrico. Encontraron que dentro de las corrientes de aire ascendentes el campo eléctrico tenía una magnitud máxima de 80 kV/m . Mientras que en el momento previo inmediato a un rayo, se encontró una magnitud de $150\text{-}200$

kV/m. En la siguiente figura se muestra el perfil vertical representativo de varios parámetros dentro de una tormenta, adaptado de los estudios de Stolzenburg et al.

En la figura 12 se aprecia que cerca de la superficie, hasta los 6 km de altura aproximadamente, hay un incremento en la intensidad del campo eléctrico muy significativo, que alcanza una magnitud de 100 kV/m y una polaridad negativa asociada con la región de la nube cargada negativamente. Esto corresponde claramente con la distribución de carga representada en la figura 11.

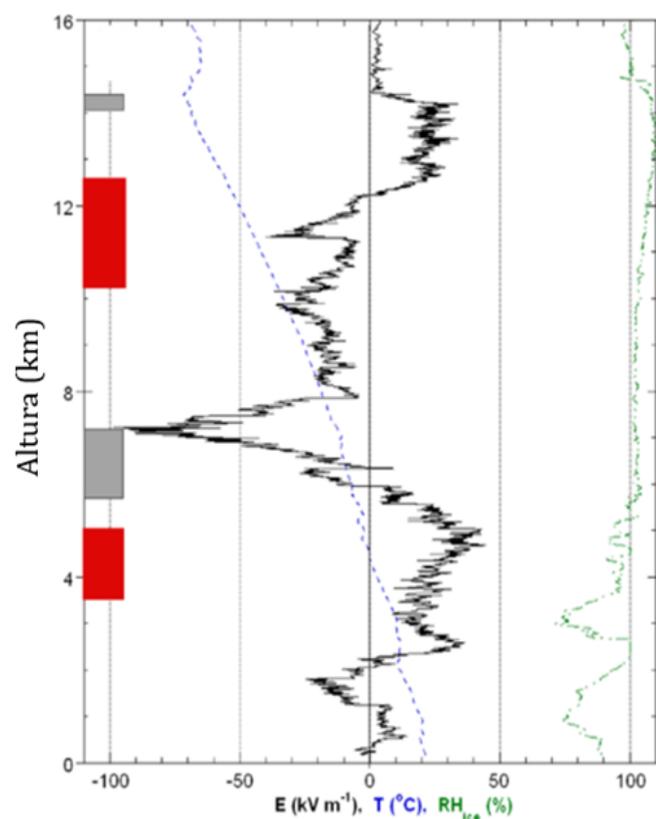


Figura 12. Perfil vertical representativo del campo eléctrico (E), temperatura (T), humedad relativa (RH_{ice}) y carga eléctrica inferida (cajas rojas para positiva, cajas grises para negativa) a través de una nube cumulonimbus. Recuperado de [14].

2.3.2.3 Las descargas eléctricas de la tormenta

Una vez que los campos eléctricos dentro de la nube de tormenta se vuelven demasiado intensos con una magnitud de 3-4 kV/cm, el aire que rodea a la nube alcanza un punto de ruptura y deja de ser aislante. Es entonces cuando se genera una descarga eléctrica con el propósito de neutralizar y redistribuir las cargas eléctricas que se encuentran desequilibradas.

Las descargas eléctricas pueden ser entre dos nubes, entre la nube y el suelo, dentro de la misma nube o entre la nube y el aire (ver la figura 13). Estas últimas ocurren muy raramente. Las descargas nube-nube y las descargas intranube son las más frecuentes, representando el 80% del número total de descargas, mientras que las descargas nube-tierra representan el 20% del total [11]. También pueden generarse, con menor frecuencia, descargas desde la tierra hacia la nube.

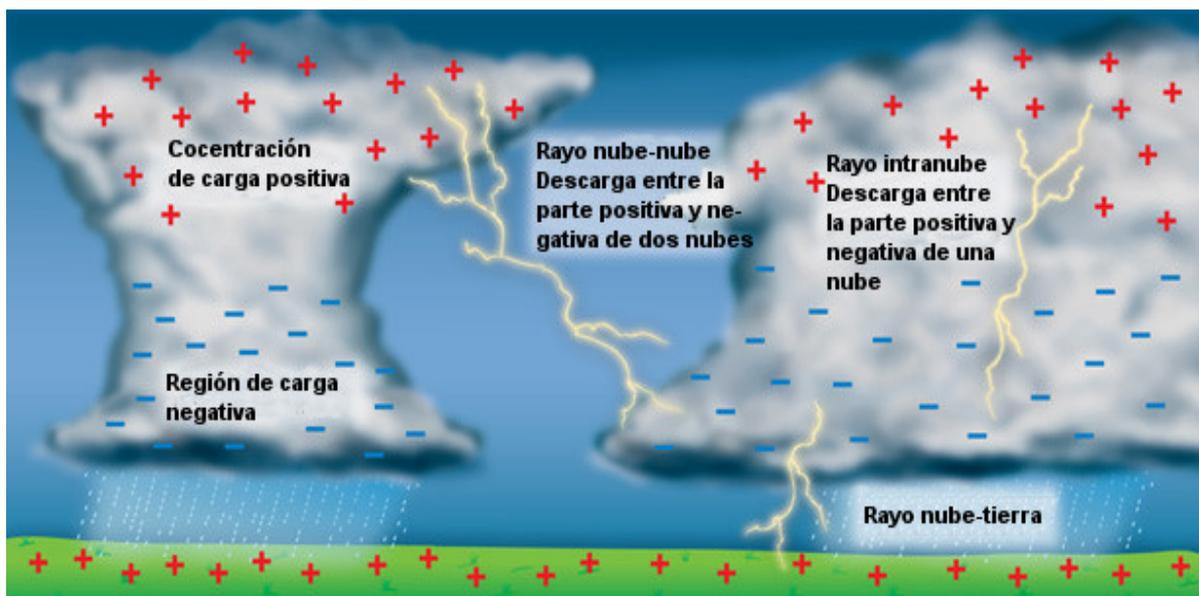


Figura 13. Esquema ilustrativo de los tipos de descarga eléctrica asociados a una o dos nubes de tormenta. Recuperado de [16].

La descarga nube-tierra es la que más comúnmente se observa y la más importante para mantener el Circuito Eléctrico Global, es aquella que lleva carga negativa al suelo.

CAPÍTULO 3:

**Monitor de campos
eléctricos Boltek EFM-100**

3.1 Introducción

El monitor de campos eléctricos atmosféricos de la marca Boltek, modelo EFM-100, es el más reciente de una serie de detectores de descargas eléctricas y de campos eléctricos atmosféricos. Este capítulo está dedicado a explicar los principios físicos que habilitan el funcionamiento del monitor. Además, en las secciones subsecuentes se detalla la manera en que deben ser interpretados los datos y las gráficas generadas por el mismo software del monitor.

Un monitor Boltek EFM-100 (ver figura 14) fue adquirido hace algunos años por el Instituto de Geofísica de la UNAM tras el surgimiento de la necesidad de contar con una base de datos referentes a la intensidad de los campos eléctricos en la atmósfera de la Ciudad de México. Esta necesidad surgió después del trabajo de investigación: “Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre” desarrollado por el M. en C. Jesús Álvarez Castillo. La investigación pudo completarse exitosamente en el año 2008 con los datos proporcionados por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, sin embargo, estos datos eran únicamente el registro de ocurrencia de tormentas eléctricas y se deseaba profundizar con las mediciones de los campos eléctricos atribuidos a esas tormentas.



Figura 14. El monitor Boltek EFM-100 montado en un tripié. Recuperada de [17].

El monitor EFM-100 está instalado en la azotea del edificio Anexo al Instituto de Geofísica y el sistema de registro y operación se encuentra en el Laboratorio de Termoluminiscencia. Fue puesto en marcha nuevamente en el año 2017 [18] y ya funciona de manera continua, monitoreando la intensidad del campo eléctrico y a su vez registrando la frecuencia con la que ocurren descargas eléctricas dentro de un radio de detección de 38.6243 km (24 mi).

El EFM-100 debe estar conectado a tierra para funcionar correctamente y como medida de seguridad. Por esta razón se montó en medio de la tierra física del edificio Anexo a Geofísica. Para evitar la detección de variaciones espurias, el montaje se efectuó a aproximadamente 6 m de distancia de los sistemas de ventilación del edificio debido al campo eléctrico que puede ser inducido por los motores.

El monitor debe funcionar por años sin mucho mantenimiento, sin embargo, es recomendable que se limpie ocasionalmente. Durante estas limpiezas es importante verificar que no tenga telarañas ni polvo acumulado [19].

3.2 Funcionamiento

La base del principio de funcionamiento del Boltek EFM-100 es el dispositivo electromecánico conocido como molino de campos eléctricos del tipo obturador rotante. Un obturador rotante está compuesto por un obturador que se mantiene en rotación gracias a un pequeño motor y una serie de electrodos sensitivos colocados de manera que uno de ellos detecte la dirección positiva del campo y el otro la dirección negativa. Los electrodos se mantienen estacionarios y conectado a ellos se encuentra un amplificador y posteriormente un resistor, que en el siguiente esquema (ver figura 15) está representado como el medidor.

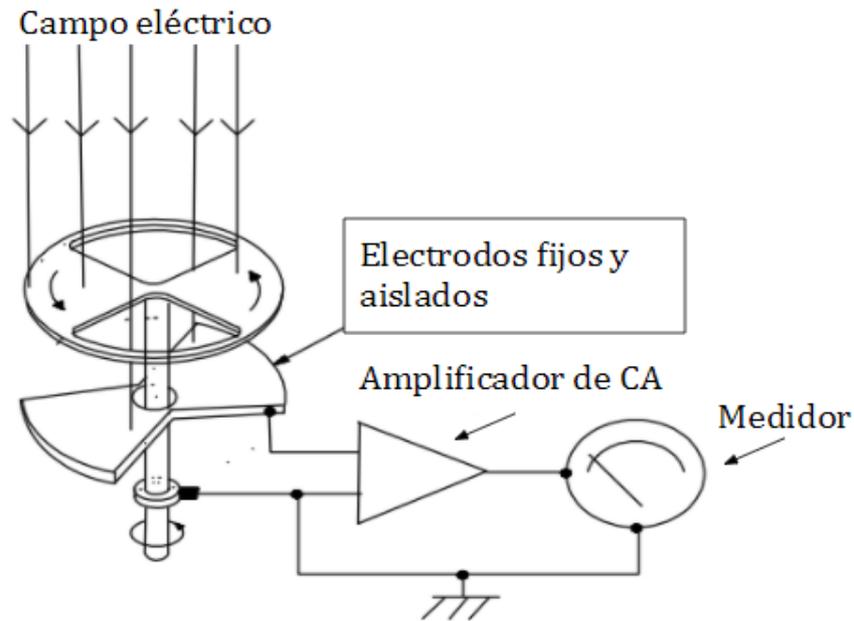


Figura 15. Esquema del molino de campos eléctricos tipo obturador rotante. Donde CA: Corriente Alterna. Recuperado y modificado de [20].

El molino tipo obturador rotante detecta campos eléctricos estáticos mediante la exposición y la cobertura alternada y repetida de los electrodos previamente descritos al campo eléctrico que se desea medir. Cuando los electrodos están expuestos al campo eléctrico externo una carga eléctrica es traída desde tierra a los electrodos a través de un resistor. Cuando los electrodos están cubiertos, la carga regresa a tierra a través del mismo resistor. Una corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas en movimiento, por ende, el proceso genera una corriente alterna que se mide como una diferencia de potencial en el resistor. La diferencia de potencial recibida en el resistor se amplifica para ser medida con mayor exactitud. La intensidad del voltaje es proporcional a la intensidad del campo eléctrico aplicado en los electrodos.

La magnitud del campo eléctrico que será detectada depende del área de los electrodos que es expuesta en un periodo de tiempo y de la permitividad del medio. Se puede utilizar el valor de la permitividad en el vacío como primera aproximación.

3.3 Interpretación de los datos obtenidos por el EFM-100

El software de operación del monitor EFM-100 viene incluido con el equipo o incluso puede obtenerse de internet. El software es capaz de mostrar de manera sencilla las mediciones realizadas en tiempo real por el EFM-100 y el estado del mismo. En la pantalla también se muestra una gráfica de los datos más recientes de tiempo contra magnitud del campo eléctrico y la escala de los ejes de la gráfica puede ser modificada en cualquier momento.

En condiciones de buen tiempo los valores del campo eléctrico estarán cercanos al cero. El paso de una tormenta sobre el monitor va a representar una variación en estos valores. En la figura 16 se observa un diagrama simple sobre la manera en que las líneas de campo eléctrico atmosférico se ven modificadas.

Observando la figura 16, se analizará y comprenderá la forma de la gráfica que se obtendrá a partir de la ocurrencia de una tormenta eléctrica. Conforme una nube de tormenta se aproxime al lugar donde el monitor se encuentra instalado, el campo eléctrico comenzará a aumentar en valores positivos y cuando la nube se encuentre directamente sobre el monitor, el campo se volverá negativo.

Mientras la nube se encuentre sobre el monitor EFM-100, la polaridad del campo eléctrico será negativa. Como las partículas de nieve y de lluvia se encuentran cargadas, producirán ruido en la gráfica. Las partículas cargadas que entren en contacto con los electrodos del molino generarán pequeños pulsos en la gráfica.

Cuando la precipitación sea muy intensa, el ruido se volverá significativo, sin embargo, tras la tormenta desaparecerá. Una vez que la nube haya seguido su camino, la polaridad también volverá a ser positiva para después ir disminuyendo a los valores del campo eléctrico en condiciones de buen tiempo. A continuación (ver figura 17) se muestra la gráfica que el software generaría en caso de que ocurra una tormenta eléctrica.

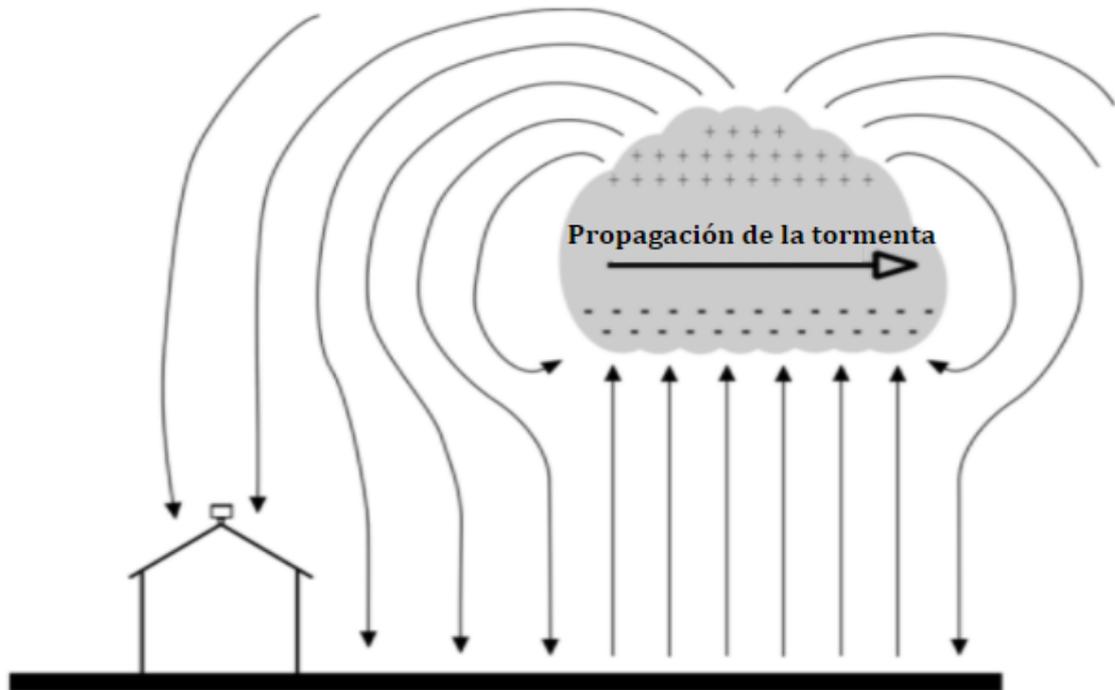


Figura 16. Diagrama ilustrativo del paso de una tormenta eléctrica sobre el monitor Boltek EFM-100 colocado en el techo de la casa. Las flechas representan las líneas de campo eléctrico. Modificado de [18].

Cuando se genere una descarga eléctrica la gráfica que se observará tendrá escalones. El escalón será mayor entre más cerca se haya producido una descarga, como se puede ver en la figura 18. Sin embargo, el ruido provocado por la precipitación puede afectar la capacidad del software de detectar rayos muy lejanos.

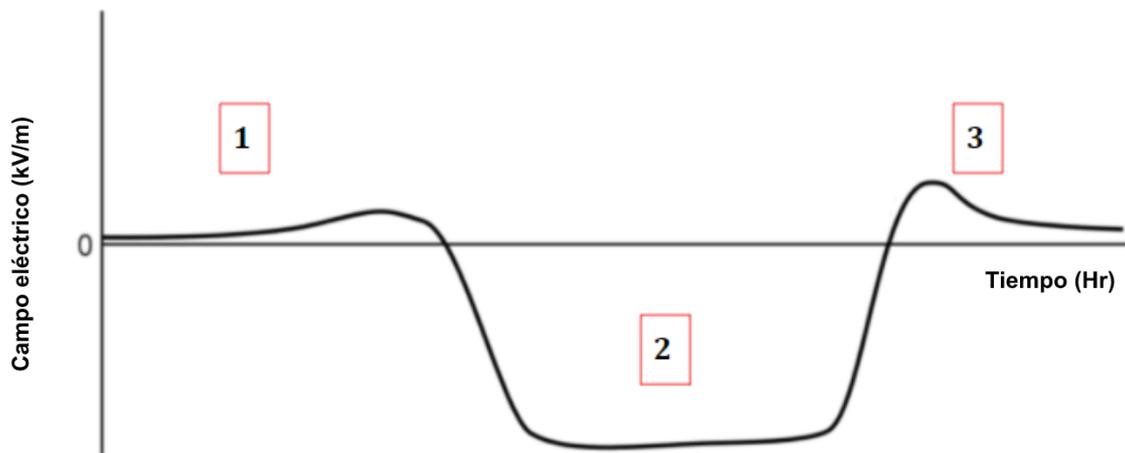


Figura 17. Gráfica generada por el software EFM-100 en caso de que ocurra una tormenta. El cero representa el valor promedio del campo eléctrico en condiciones de “buen tiempo”. La etapa 1 representa el momento en que una nube de tormenta se aproxima al monitor. La etapa 2 representa el periodo de tiempo en el que la nube de tormenta se encuentra directamente sobre el monitor. La etapa 3 representa el momento en el que la nube se retiró, ocurriendo una última oscilación antes de regresar al valor del campo eléctrico de buen tiempo. Modificado de [18].

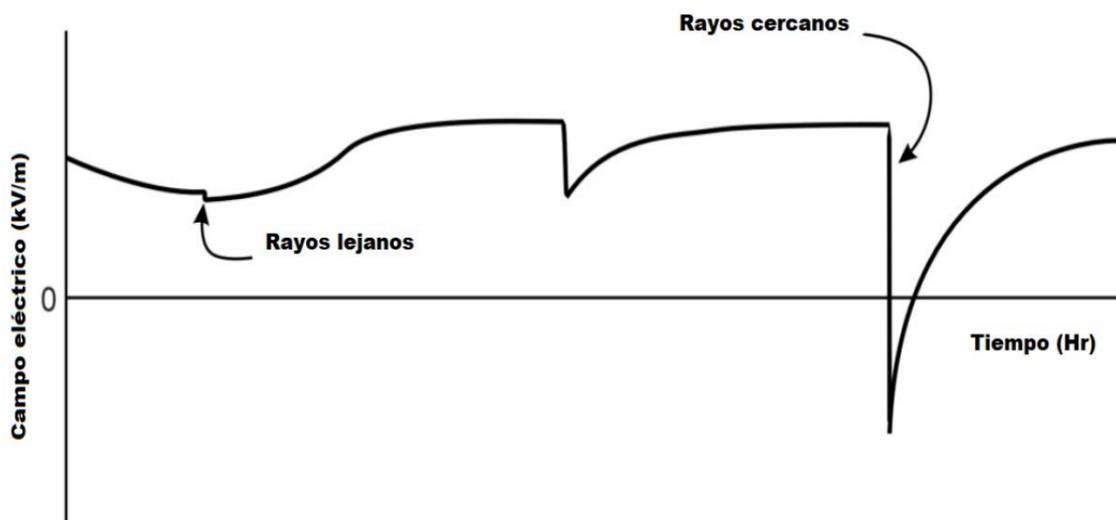


Figura 18. Gráfica generada por el software EFM-100 representando los escalones que indican la generación de una descarga eléctrica y su cercanía al monitor. Recuperado de [18].

Tomando en cuenta las figuras 17 y 18 se puede interpretar fácilmente la gráfica generada por el mismo software. Sin embargo, al extraer los datos, se pudieron generar gráficas propias. A continuación se muestra la gráfica (ver figura 19) de una tormenta muy intensa, que abarcó los límites de detección del monitor (20,-20) kV/m, ocurrida el 26 de marzo del 2017:

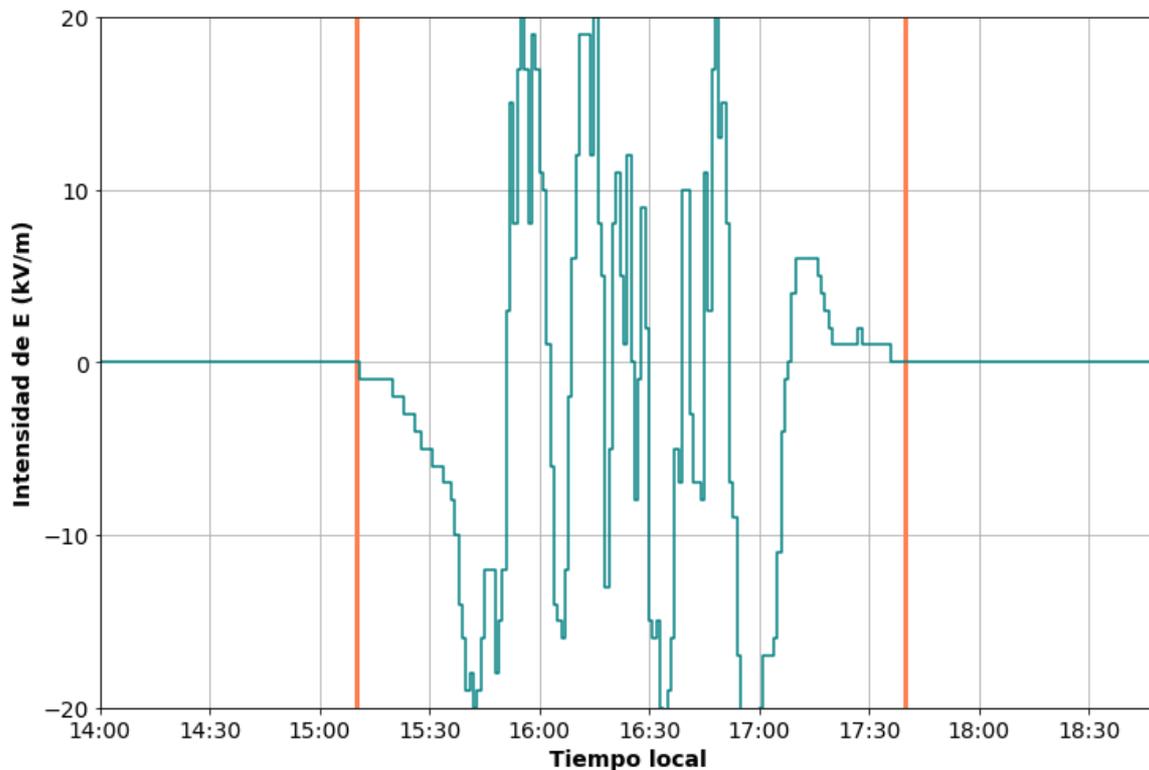


Figura 19. Gráfica de la tormenta eléctrica ocurrida el 26 de marzo del 2017, generada a partir de los datos registrados por el monitor Boltek EFM-100. Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta, respectivamente.

En la figura 19 se observa la caída inicial entre las etapas 1 y 2 de la figura 16, lo cual marca el inicio de la tormenta eléctrica. Posteriormente hay caídas e incrementos instantáneos que representan el paso de varias nubes de tormenta. También se aprecia claramente que en los instantes previo y posterior a la tormenta, el campo eléctrico se encuentra perfectamente constante en el cero.

CAPÍTULO 4:

Observatorio de Rayos

Cósmicos de la Ciudad de

México

4.1 Introducción

El Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORCCM) se encuentra ubicado dentro de Ciudad Universitaria, en las afueras de la Facultad de Veterinaria, mientras que el Instituto de Geofísica de la UNAM es el encargado de su operación y administración. La historia del ORCCM está comprendida en la sección 4.2 debido a que la instalación y mantenimiento del mismo han sido trascendentales para la investigación desarrollada en el Instituto de Geofísica. A su vez, se explicarán a detalle los procesos físicos que permiten el funcionamiento correcto del monitor de neutrones 6-NM64 instalado en el ORCCM. Los datos registrados por este monitor constituyen la base de los análisis llevados a cabo en este trabajo.

El ORCCM fue nombrado “Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu” en honor al Dr. que dedicó gran parte de su tiempo a asegurarse del correcto funcionamiento del monitor de neutrones. Forma parte de una red dedicada a mapear la radiación cósmica que llega a la Tierra, con más de cincuenta observatorios distribuidos alrededor del mundo. La edificación construida para el ORCCM se muestra en la fotografía de la figura 20.



Figura 20. Estación de rayos cósmicos del ORCCM.

4.2 Historia del ORCCM

La historia del ORCCM se remonta al año de 1948, cuando fue instalada en la Ciudad de México una cámara de ionización. La cámara fue el primer detector de radiación cósmica que llegó a México. En 1956 la Universidad de Chicago, con motivo del Año Geofísico Internacional, donó un monitor de neutrones IGY a la UNAM. El monitor fue instalado en el antiguo Pabellón de Rayos Cósmicos en Ciudad Universitaria (ver figura 21).



Figura 21. Antiguo Pabellón de Rayos Cósmicos, Ciudad Universitaria.

Ocho años más tarde, el Instituto de Geofísica inició la construcción de una nueva Estación de Rayos Cósmicos en las afueras de Ciudad Universitaria, donde se procedió a instalar un monitor de neutrones 6-NM64 con equipo donado por el Dr. John Bland de la Universidad de Calgary. Este nuevo monitor trabajaría en conjunto con el monitor IGY hasta principios de 1975, cuando el IGY fue desmantelado y el Pabellón de Rayos cósmicos pasó a ser propiedad de la Facultad de Odontología de la UNAM. Actualmente el monitor IGY se encuentra en exhibición en el Museo de Geofísica de la Ciudad de México.

Sin embargo, a principios de 1976, el Dr. Otaola Lizarzaburu tomó la decisión de desmantelar y reconstruir el NM64. La operación del monitor no era la adecuada debido a errores de construcción. Además, se decidió modernizar completamente el

sistema de adquisición de datos. El almacenamiento de datos fue reemplazado por cintas magnéticas y se reconstruyeron los anillos de plomo.

La etapa de modernización y mantenimiento del ORCCM duró un par de décadas. Fue en 1990 que se publicaron por primera vez los datos obtenidos por el 6-NM64 y funciona continuamente desde entonces.

Hacia el año de 1995 el Dr. Otaola Lizarzaburu falleció y por ende, el Dr. José Francisco Valdés-Galicia tomó cargo del Observatorio. Con la dirección del Dr. Valdés-Galicia se instaló un telescopio de muones en el Observatorio de Rayos Cósmicos y a partir del año 2008 se encuentra trabajando en forma continua. Algunas de las aportaciones del ORCCM a la comunidad científica son:

- Detección de protones solares de hasta 15 GeV el 29 de septiembre de 1989. Fue el evento solar más grande que se ha podido detectar en los últimos años.
- Detección del evento de neutrones solares del 24 de mayo de 1990.
- Hallazgo de una variación de 115 días en el ciclo solar.
- Análisis de los efectos de campos eléctricos atmosféricos en los rayos cósmicos detectados en la superficie.
- En 1995 investigadores de la Universidad de Roma utilizaron los datos del monitor de México para calibrar sus detectores.

Además de estas aportaciones, gracias al Observatorio se han producido; una tesis de doctorado, tres tesis de maestría y dos de licenciatura. Actualmente se están realizando más trabajos de investigación.

En la figura 22 se puede observar el monitor que se ubica a 19.33° de latitud y 99.18° de longitud. Se encuentra en una elevación de 2274 m sobre el nivel del mar, detectando partículas con una rigidez de 8.23 GV. Trabaja las 24 horas del día, los 365 días del año y sus datos pueden consultarse en tiempo real por internet [21].

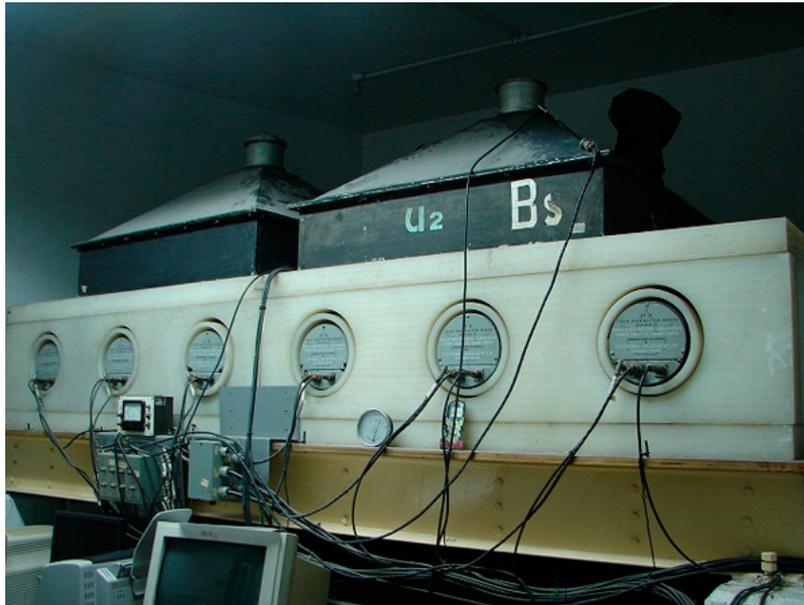


Figura 22. Monitor 6-NM64 instalado en el ORCCM, dentro de la estación de rayos cósmicos.

4.3 Funcionamiento del monitor de neutrones 6-NM64

En 1964 Hugh Carmichael diseñó el Super Monitor de Neutrones NM64 en los laboratorios Chalk River con el propósito de iniciar una red internacional de detectores de neutrones para el estudio de rayos cósmicos. Este monitor tiene una capacidad de conteo de hasta 750,000 cuentas por hora y es sensible a la RC secundaria que incide con un rango de energías entre 0.5 y 20 GeV [22].

Los monitores de neutrones NM64 son nombrados de acuerdo al número de contadores proporcionales de trifluoruro de boro (BF_3) que contienen. En este caso, el monitor 6-NM64 cuenta con seis contadores, mientras que el número 64 se refiere al año en que fue diseñado.

Los monitores NM64 tienen cuatro componentes principales: el reflector, el productor, el moderador y el contador proporcional. Estos componentes se ensamblan de la manera que se muestra en la figura 23.

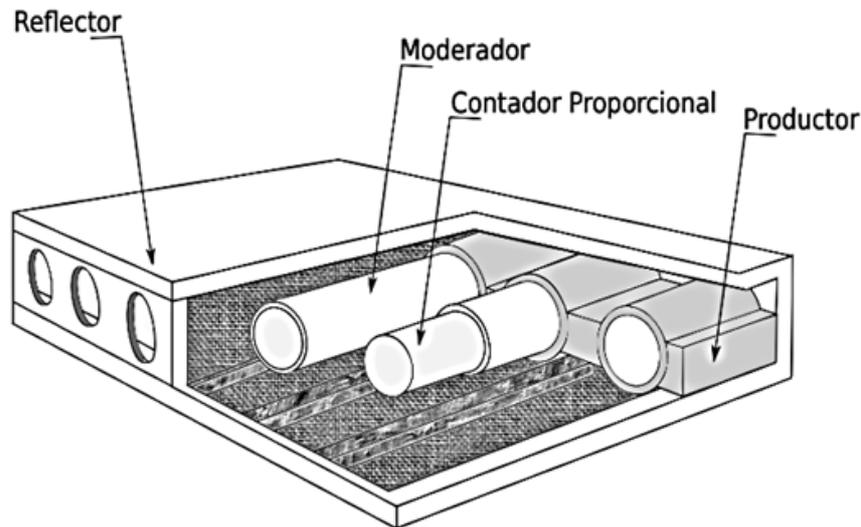


Figura 23. Esquema representativo de los componentes del monitor 6-NM64. Recuperado de [23].

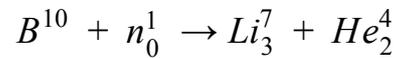
El reflector es una estructura construida con bloques de polietileno de baja densidad que rodea todo el equipo. Los rayos cósmicos secundarios atraviesan este material sin pérdidas de energía importantes. Esta capa de polietileno impide que los neutrones creados en el productor escapen reflejándolos hacia los contadores proporcionales, mientras que los neutrones de menor energía provenientes del exterior son absorbidos por el polietileno.

El moderador es otra estructura de polietileno en forma de tubo con un diámetro exterior de 24.5 cm y un grosor de 2 cm. Pueden utilizarse como moderador otros materiales como la parafina o el agua, compuestos con una masa atómica pequeña. La función del moderador es reducir la velocidad de los neutrones incidentes mediante el intercambio de energía cinética por colisiones con otros núcleos. Los neutrones más lentos tienen una mayor probabilidad de ser detectados.

El productor está compuesto por anillos de plomo con 25.4 cm de diámetro interior y 35.6 cm de diámetro exterior. La función de estos anillos es producir neutrones de baja energía, los cuales serán detectados por el contador proporcional. Estos neutrones se producen a partir de reacciones nucleares entre el plomo y los protones y neutrones (RC secundaria) que atraviesan el reflector.

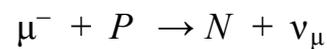
El contador proporcional está relleno de trifluoruro de boro (BF_3) gaseoso a una presión de 0.27 bar, enriquecido al 96% con ^{10}B . El principio bajo el cual funciona el monitor se basa en una reacción química exotérmica desencadenada por los neutrones que inciden en el contador después de haber atravesado el moderador. Esta reacción

con el boro presente en el contador produce núcleos de litio y helio de la siguiente manera:



Estos núcleos se recolectan en un cátodo y generan una corriente eléctrica que puede ser medida. Todo este proceso representa el 77% de los pulsos totales obtenidos, mientras que el 15% son generados por protones, 7% por muones negativos suaves y 1% por piones y otras partículas inestables [3].

El 7% de pulsos adicionales registrados por el monitor de neutrones son generados debido a que los muones negativos, al ser frenados dentro de los anillos de plomo, son capturados por un núcleo mediante la reacción:



Donde μ^- es un muón negativo suave (muón de poca energía, que se absorbe por 10 cm de Pb), P es un protón, N es un neutrón y ν_μ es un neutrino. La mayor parte de la energía del muón en reposo es tomada por el neutrino. El número promedio de neutrones producidos mediante este proceso es de 1.6 ± 0.2 [4].

CAPÍTULO 5:

Análisis de datos y

resultados

5.1 Introducción

Los análisis estadísticos que se desarrollan como parte esencial de este trabajo están fundamentados en la búsqueda de tendencias sistemáticas en las variaciones de la intensidad de rayos cósmicos secundarios registrada por el monitor de neutrones 6-NM64, además, estas tendencias deben tener una relación lineal con campos eléctricos atmosféricos intensos. Con base en lo mencionado en la sección 3.3, es posible identificar estos campos eléctricos con facilidad a partir de las gráficas generadas por el monitor Boltek EFM-100.

Según lo descrito en la sección 4.3, se atribuye un pequeño porcentaje de la tasa de conteo de un monitor de neutrones 6-NM64 a una reacción desencadenada por muones negativos. Los muones negativos, por ser partículas cargadas, se ven acelerados por la presencia de cualquier campo eléctrico. En este caso, la base del presente trabajo es precisamente la variación en la tasa de conteo del monitor del ORCCM debida al efecto de los campos eléctricos generados por una tormenta sobre los muones negativos.

Dado que el porcentaje de pulsos obtenidos tras la reacción del plomo con los muones negativos por el monitor de neutrones es de aproximadamente 7%, la variación en la intensidad total registrada debe ser muy pequeña, sin embargo, distinguible. En la sección 5.1.1 se establecerá el rango de variación esperado.

Los diferentes tipos de análisis de datos que fueron llevados a cabo se explicarán en este capítulo. Cada uno tiene un propósito específico, de manera que se comenzará con un análisis básico, en caso de que no se encuentren los resultados esperados, se aumentará la complejidad del análisis o se cambiará el enfoque del análisis previo.

5.1.1 Teoría de Dorman

Para interpretar los resultados que se obtengan a partir de los siguientes análisis de datos es necesario comprender la teoría de Dorman, según la cual, es posible la detección de tormentas eléctricas mediante las fluctuaciones de la intensidad de rayos cósmicos registradas en un monitor de neutrones [24].

En el capítulo anterior se mencionó que alrededor del 7% de los datos registrados por un monitor de neutrones son atribuidos a muones negativos suaves que generan una

reacción en los anillos de plomo. Al ser frenado por la materia, el muón negativo es capturado por un núcleo y reacciona con un protón, lo cual produce un neutrón y un neutrino que se queda con la mayor parte de la energía de la reacción. Un campo eléctrico atmosférico tendrá efecto sobre los muones, por ende, afectando ligeramente el conteo de un monitor de neutrones.

A partir de las ecuaciones desarrolladas por Dorman en su teoría general de las variaciones atmosféricas de la componente muónica de los rayos cósmicos, bajo una presión atmosférica de observación h_0 , la variación en la intensidad de neutrones ($\Delta I_n(h_0)$) causada por un campo eléctrico, denotado con el subíndice "ae", viene dada por la siguiente expresión:

$$\left[\frac{\Delta I_n(h_0)}{I_n(h_0)} \right]_{ae} = k \left[\frac{\Delta I_m^-(h_0)}{I_m^-(h_0)} \right]_{ae}$$

donde I_m^- representa la intensidad de muones suaves negativos y k es una constante medida experimentalmente ($k=0.07$). Con datos registrados a nivel del mar, la variación obtenida debida a efectos de un campo eléctrico atmosférico con una magnitud de 10-20 kV/m fue de 0.35%.

Suponiendo un campo eléctrico de 100 y 300 V/cm, entre una $h_0 = 700 \text{ g/cm}^2$ y $h_c = 1000 \text{ g/cm}^2$, Dorman [24] también calculó los valores estimados para las variaciones de los muones suaves que se encuentran en cierto rango de energía. El resultado fue un porcentaje de variación definido dentro de un rango de -3.9% a -11.7%, el signo negativo proviene del hecho de que los muones considerados tienen carga negativa. Estos resultados conllevan un cambio en la razón de conteo de un monitor de neutrones de aproximadamente 0.27%-0.81%.

Considerando el mismo valor de h_0 utilizado en los cálculos realizados por Dorman, pero con una $h_c = 790 \text{ g/cm}^2$ correspondiente a la Ciudad de México, con los mismos valores de campo eléctrico, se obtiene una variación en la razón de conteo de 0.35% a 0.8%. En principio, este porcentaje de variación debe ser distinguible en el monitor 6-NM64 del Observatorio de Rayos Cósmicos de la CDMX, puesto que se ha mejorado bastante su resolución, ahora en una cuenta por minuto. [4]

5.2 Primer análisis de datos

El objetivo de este trabajo de investigación es encontrar una relación lineal entre los conjuntos de datos registrados por los detectores que fueron descritos en los capítulos previos, de manera que se observe una tendencia sistemática y consistente en diferentes casos. Además, se busca obtener resultados tangibles con base en la Teoría de Dorman [24].

5.2.1 Criterio para la primera selección de tormentas eléctricas

Para la selección de las tormentas eléctricas que se utilizarán, se tomaron en cuenta los datos del monitor Boltek EFM-100 ubicado en la azotea del edificio del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se consideraron los datos registrados en el año 2017 y a partir de estos datos se observaron las gráficas generadas por el mismo software del detector, que muestran el comportamiento del campo eléctrico atmosférico para cada día del año. Se eligieron aquellos días que mostraran el campo eléctrico típico asociado con tormentas eléctricas. Posteriormente, se seleccionaron 10 tormentas muy intensas; con magnitudes cercanas a los 20 kV/m de campo eléctrico atmosférico (E), las cuales se muestran en la tabla 1.

Fecha (2017)	Duración (hrs)	Intervalo de duración (Tiempo local)	Valor máximo de E (kV/m)	Valor mínimo de E (kV/m)
26 de marzo	2.5	15:10-17:40	20	-20
6 de abril	9	14:30-23:30	19	-19
27-28 de junio	6	18:30-00:30	20	-20
2 de julio	3.5	16:30-20:00	19	-20
5 de julio	2.25	16:45-19:15	19	-20
17-18 de agosto	7.25	17:00-00:15	18	-20
18 de agosto	6.25	16:45-23:00	20	-20
31 de agosto	4.75	18:00-22:45	20	-20
6 de septiembre	5.5	17:00-22:30	17	-20
15 de octubre	2.5	17:30-20:00	19	-20

Tabla 1. Datos de las tormentas eléctricas más intensas del año 2017.

5.2.2 Resultados

Con base en los periodos de tormenta definidos, se utilizaron los datos del ORCCM y los datos de la intensidad del **E** atmosférico registrados por el Boltek EFM-100 con razón de conteo de 1 minuto.

Se elaboraron gráficas comparativas del comportamiento de los datos durante la tormenta eléctrica y un rango de tiempo adicional de $\pm 50\%$ la duración de la tormenta; donde el panel superior representa el **E** atmosférico y el panel inferior representa el conteo de rayos cósmicos. El tiempo adicional sirvió para observar cómo se comportan los datos del monitor de neutrones cuando el estado de tiempo es tranquilo.

La figura 24 muestra con claridad la tormenta eléctrica del 26 de marzo 2017, que comenzó alrededor de las 15:10 en la CDMX. El conteo del monitor de neutrones del ORCCM no tiene tendencias sistemáticas significativas, los datos fluctúan de manera muy similar a las fluctuaciones durante buen tiempo. Los resultados fueron los mismos para las demás tormentas analizadas y se muestran en las figuras 25 y 26.

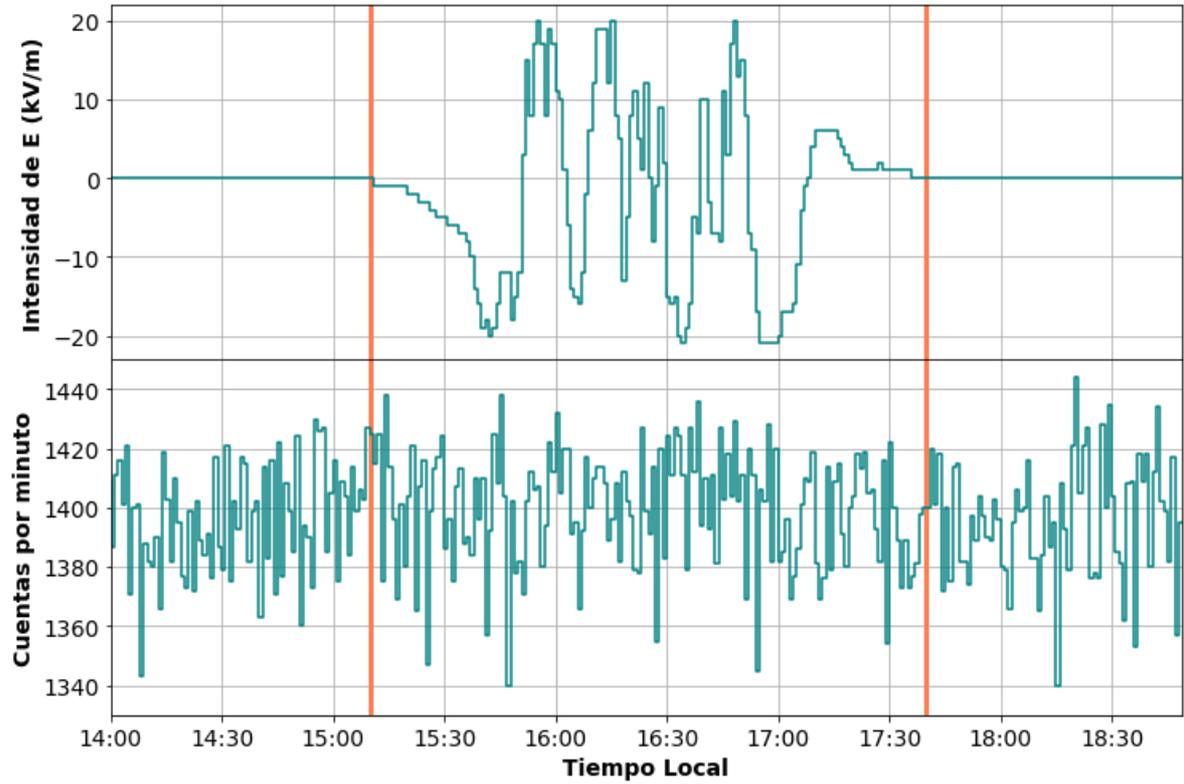


Figura 24. Gráficas comparativas para la tormenta del 26 de marzo 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC registrada por el monitor de neutrones del ORCCM (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

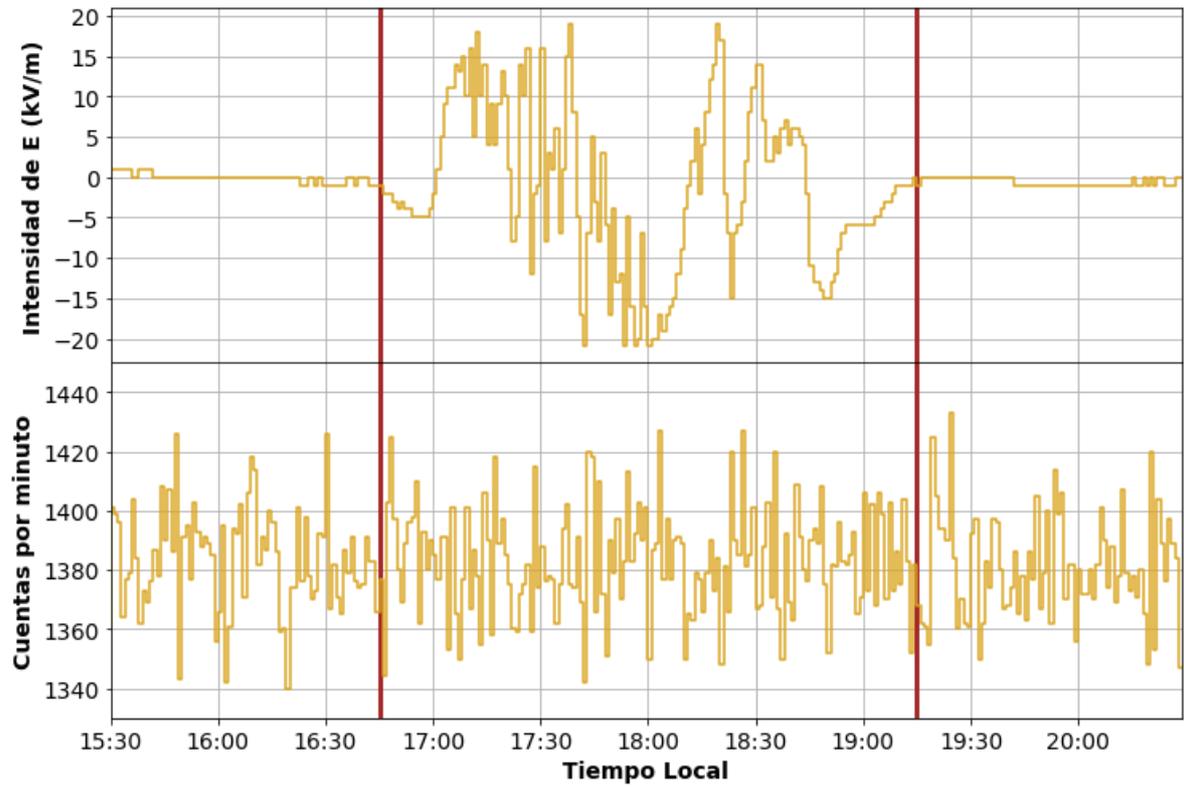


Figura 25. Gráficas comparativas para la tormenta del 5 de julio 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC registrada por el monitor de neutrones del ORCCM (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

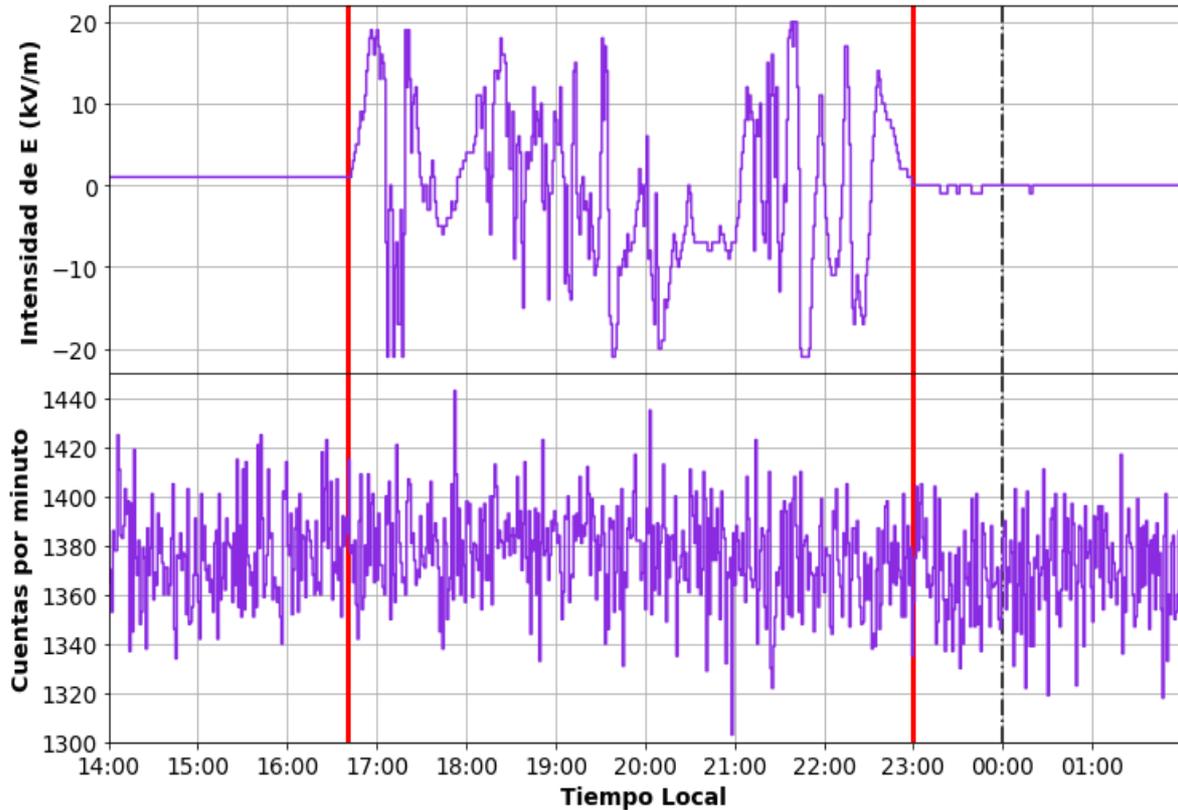


Figura 26. Gráficas comparativas para la tormenta del 18 de agosto 2017 del E atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC registrada por el monitor de neutrones del ORCCM (panel inferior). Las líneas rojas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente, mientras que la línea punteada representa el comienzo del siguiente día (19/08/17).

Las gráficas mostradas en las figuras 24, 25 y 26 se hicieron con el objetivo de encontrar coincidencias evidentes de máximos y mínimos simultáneos que pudiesen mostrar una correlación directa entre ambos sets de datos. De manera que un máximo en el campo eléctrico coincidiera con un mínimo en los rayos cósmicos. Sin embargo, estas coincidencias evidentes no se encontraron en ninguna de las gráficas. Por ende, se realizaron otros análisis que pudiesen determinar alguna relación.

5.3 Análisis de medias móviles para el conteo de RC

El análisis de medias móviles elimina el ruido provocado por fluctuaciones aleatorias de los datos. En este caso, se tomaron la misma cantidad de medias de un lado y otro a partir de un valor central; esto asegura que las variaciones en la media no se vean sesgadas por datos únicamente del pasado y se tomen en cuenta también los datos consecuentes.

Considerando las mismas diez tormentas de la tabla 1, para los datos de cuentas por minuto del monitor de neutrones se utilizó una media móvil centrada de 7, ya que con este valor se mantenía el mayor número de datos sin perder información.

Posteriormente, se realizaron el mismo tipo de gráficas comparativas para este caso. Las gráficas para las mismas tres tormentas más intensas del análisis anterior se muestran en las figuras 27, 28 y 29.

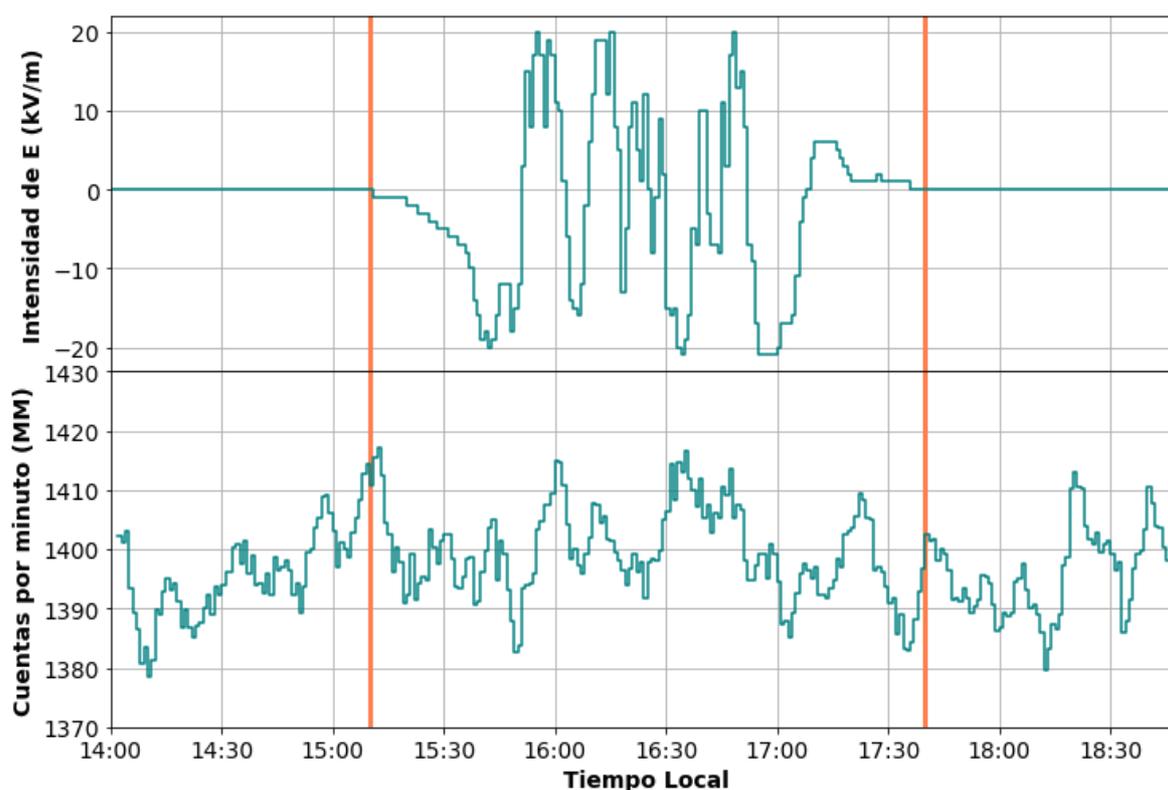


Figura 27. Gráficas comparativas para la tormenta del 26 de marzo 2017 del E atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7 (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

En la figura 27 nuevamente se representa la tormenta del 26/03/17, se aprecia que para el conteo del monitor de neutrones con datos filtrados no existe una tendencia significativa. Las variaciones se mantienen en el rango de 1380-1420 cuentas por minuto, incluso los mayores decrecimientos en la intensidad de RC se registran para periodos de buen tiempo. La ausencia de una tendencia sistemática se observa también en las figuras 28 y 29 para otras tormentas.

Al igual que en el análisis realizado en 5.2, no se observan variaciones evidentes, por lo que se llevó a cabo con otro tipo de análisis.

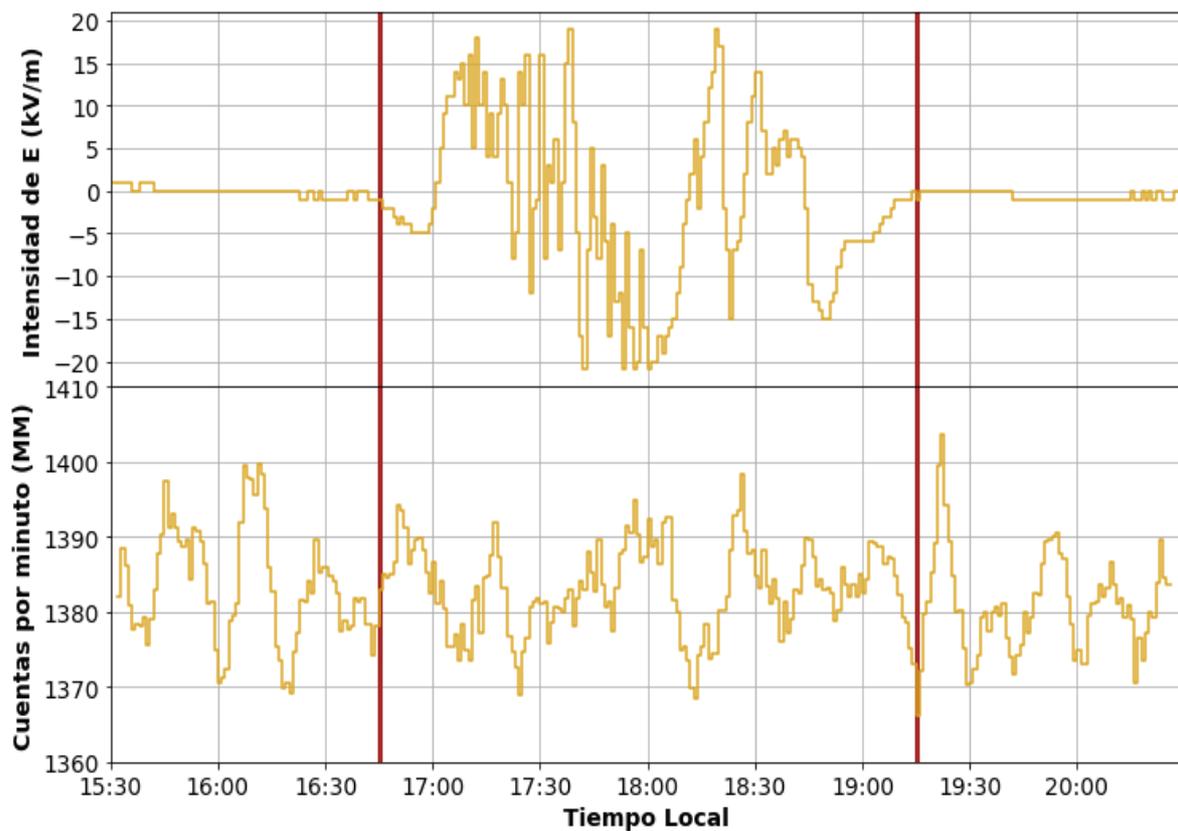


Figura 28. Gráficas comparativas para la tormenta del 5 de julio 2017 del E atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7 (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

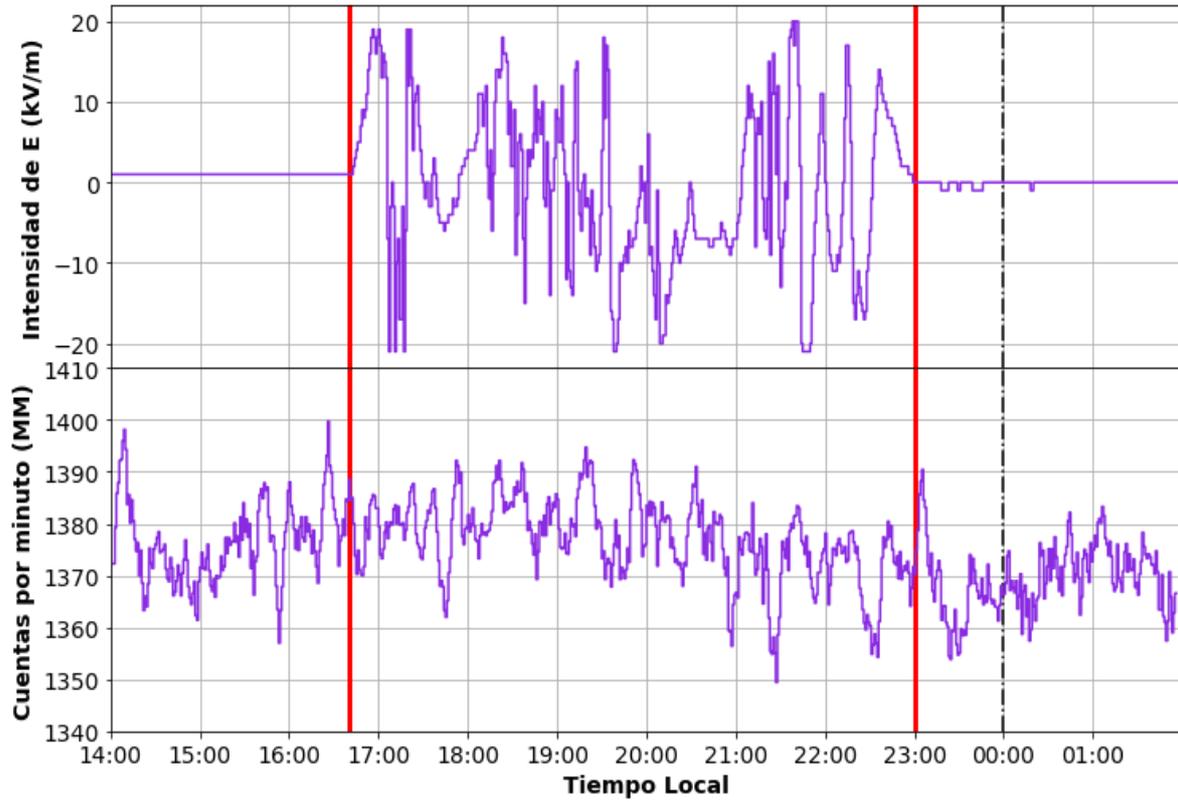


Figura 29. Gráficas comparativas para la tormenta del 18 de agosto del 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7 (panel inferior). Las líneas rojas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente, mientras que la línea punteada representa el comienzo del siguiente día (19/08/17).

5.4 Análisis de regresión lineal

La regresión lineal es un análisis estadístico que busca modelar, a partir de observaciones experimentales, la relación entre dos variables con una ecuación lineal. El modelo más simple se basa en la ecuación de la recta:

$$y = ax + b$$

donde y es la variable independiente, a es la pendiente de la recta, x es la variable dependiente y b es el intercepto o la ordenada al origen; es decir, el valor de y cuando $x=0$.

Este tipo de análisis estadístico tiene muchas aplicaciones prácticas, sin embargo, en este caso se utilizará para determinar qué tan fuerte es la relación entre las variaciones del campo eléctrico de una tormenta (**E**) y las cuentas registradas en un monitor de neutrones (intensidad de RC secundaria).

Se consideró la intensidad de RC, previamente filtrada con una media móvil de 7, como la variable independiente en el eje y , mientras que el **E** se consideró la variable dependiente en el eje x . Con los datos de las mismas diez tormentas de la tabla 1, se elaboraron inicialmente 10 gráficas de dispersión considerando los datos de todo el día de la tormenta. Posteriormente, se sobrepuso en la misma figura el modelo de regresión lineal simple con su respectiva recta ajustada a los valores encontrados en la gráfica de dispersión para cada tormenta.

Las figuras 30, 31 y 32 plasman evidentemente una recta del mejor ajuste, obtenido por el método de mínimos cuadrados, respectivo a cada tormenta con una pendiente muy cercana al 0, lo cual deja claro que es un modelo de regresión lineal muy débil. Además, se observa una dispersión de datos con la mayor concentración de los mismos en la intensidad de 0 kV/m que corresponde inequívocamente al **E** de buen tiempo. Lo mismo ocurre para las figuras 30 y 31, no cabe resaltar ninguna de las gráficas puesto que no muestran un modelo que se considere significativo y represente una correlación fuerte entre los datos.

Al observar y analizar las gráficas es evidente que el modelo no parece ser significativo con los datos; sin embargo, también se calcularon los valores estadísticos representativos de la regresión lineal, con énfasis especial en el coeficiente de regresión. En la tabla 2 se enlistan los valores obtenidos para cada tormenta.

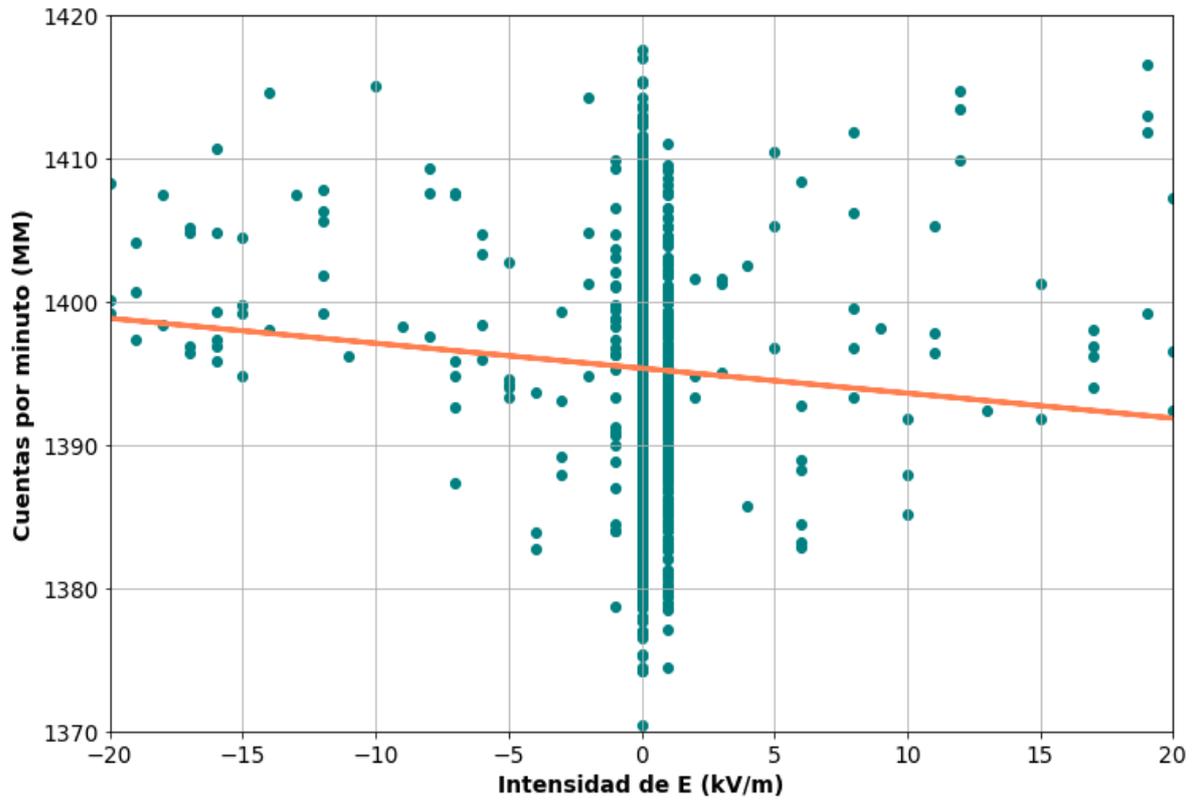


Figura 30. Modelo de regresión lineal para la tormenta eléctrica del 26 de marzo del 2017.

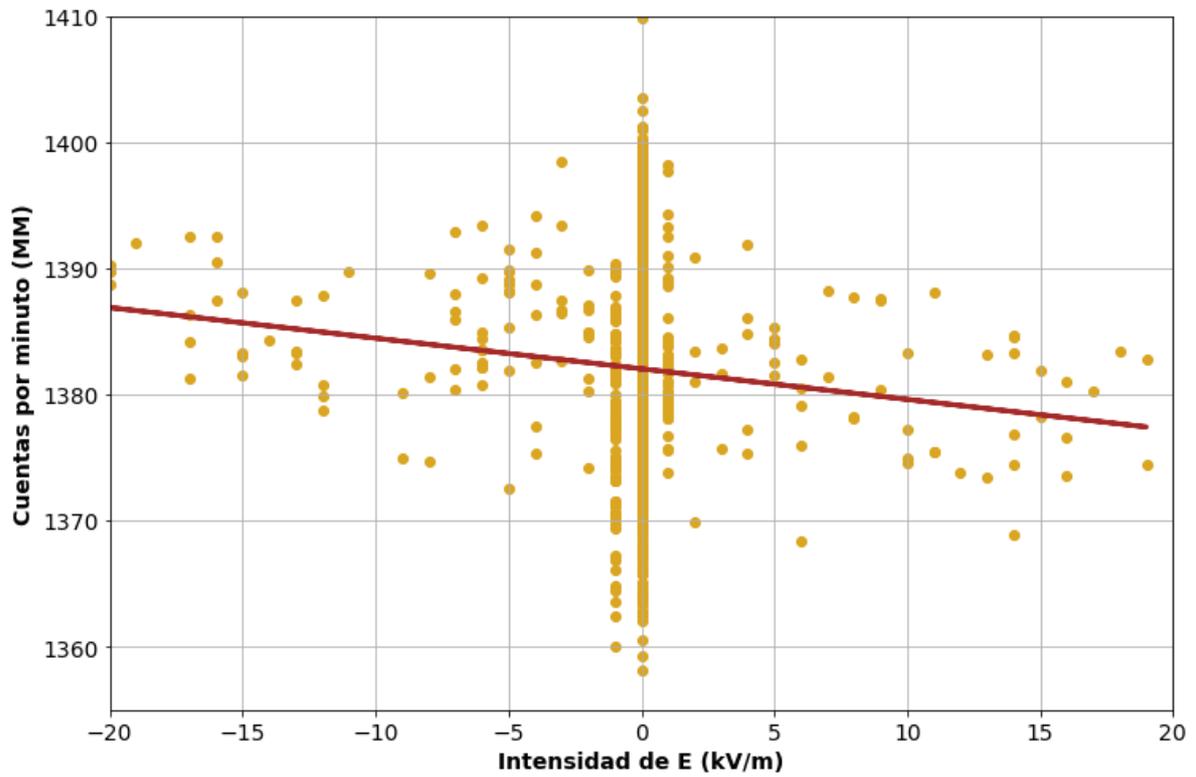


Figura 31. Modelo de regresión lineal para la tormenta eléctrica del 5 de julio del 2017.

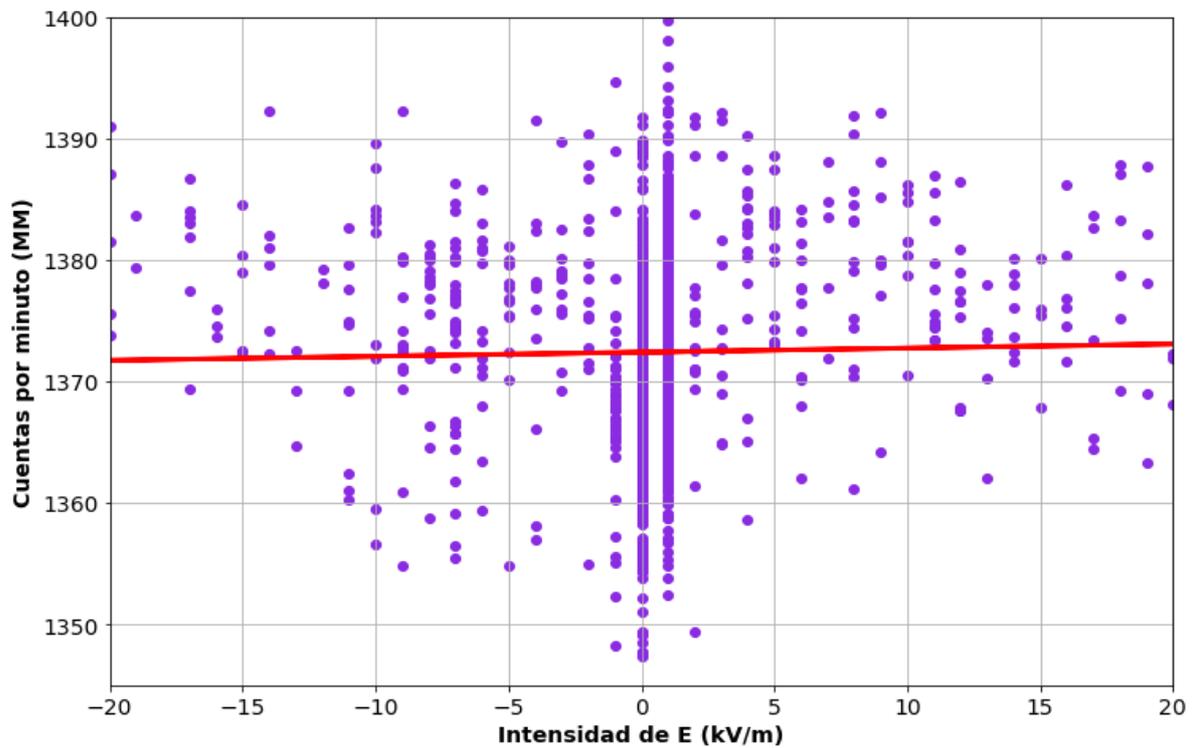


Figura 32. Modelo de regresión lineal para la tormenta eléctrica del 18 de agosto del 2017.

Tormenta	Coefficiente de correlación (R ²)	Pendiente de la recta	Ordenada al origen	Error mínimo cuadrático
26 de marzo	0.006	-0.17	1395.34	62.25
6 de abril	2e ⁻⁴	0.03	1377.28	67.50
27-28 de junio	0.016	0.23	1373.36	63.11
2 de julio	0.005	-0.15	1383.26	71.20
5 de julio	0.011	-0.24	1382.04	55.22
17-18 de agosto	1e ⁻⁷	5e ⁻⁴	1375.56	74.17
18 de agosto	4e ⁻⁴	0.03	1372.41	66.92
31 de agosto	0.001	-0.05	1376.11	70.14
6 de septiembre	0.011	0.20	1380.58	60.30
15 de octubre	7e ⁻⁴	-0.07	1365.58	78.44

Tabla 2. Valores estadísticos asociados al modelo de regresión lineal de cada tormenta.

Para este análisis, la ordenada al origen del modelo de regresión lineal representa el valor estimado de cuentas en el monitor de neutrones que se registrarán cuando el campo eléctrico es igual a 0 kV/m. La pendiente de la recta es importante para conocer si la relación lineal es positiva o negativa, sin embargo, en este caso las pendientes de estas rectas son muy cercanas al cero, lo cual indica que la relación no es lo suficientemente significativa o incluso se puede considerar inexistente.

El coeficiente de determinación representa la proporción de la variación en la variable dependiente que es predecible a partir de la variable independiente. Para interpretar el coeficiente de determinación, se debe tomar en cuenta que cuando es igual a 1 las predicciones del modelo de regresión lineal son perfectas. Entre más cercano se encuentre el valor de R² al cero, menos se considera significativo el modelo y la relación entre ambas variables es muy débil. En este caso, para ninguna tormenta se encontró un valor de R² mayor a 0.5, lo cual indicaría una correlación moderada pero significativa. Debido a esto, se puede reiterar lo observado en las gráficas anteriores. La correlación parece ser muy débil, lo cual fue un incentivo para continuar realizando otros análisis. Además cabe recalcar que el error asociado al método de ajuste por mínimos cuadrados es muy alto en todos los casos.

5.5 Porcentaje de variación con respecto a la media de la intensidad de RC en condiciones de buen tiempo

Para cada una de las diez tormentas elegidas desde el primer análisis de este trabajo, se filtraron nuevamente los datos registrados por el ORCCM con una media móvil de 7. Entonces, se eliminaron los datos de la intensidad de RC que fueron registrados precisamente durante la tormenta. Después, a los datos restantes se les calculó el promedio y este promedio fue considerado como el 100%. Finalmente, se tomaron los datos que abarcaban ahora sí la duración de la tormenta con un tiempo adicional igual a la misma; es decir, si la tormenta tuvo una duración de 5 horas, se agregaron los datos correspondientes a las 5 horas previas y las 5 horas consecuentes a la tormenta. A cada valor dentro de esta última selección de datos se le dividió entre el promedio calculado al comienzo de este análisis.

De este modo, se realizó una gráfica para cada tormenta donde se muestra cómo fue variando el porcentaje de intensidad de la RC a lo largo del periodo de tiempo previamente descrito. También se le agregó a las gráficas un panel superior de comparación donde se muestra la intensidad del campo eléctrico atmosférico para el mismo periodo. Los resultados se muestran en las figuras 33, 34 y 35.

La figura 33, elaborada con datos filtrados, muestra variaciones más limpias y normalizadas al promedio del conteo del monitor de neutrones en condiciones de buen tiempo. Tampoco fue posible encontrar tendencias evidentes ni coincidencias entre ambos paneles de la figura.

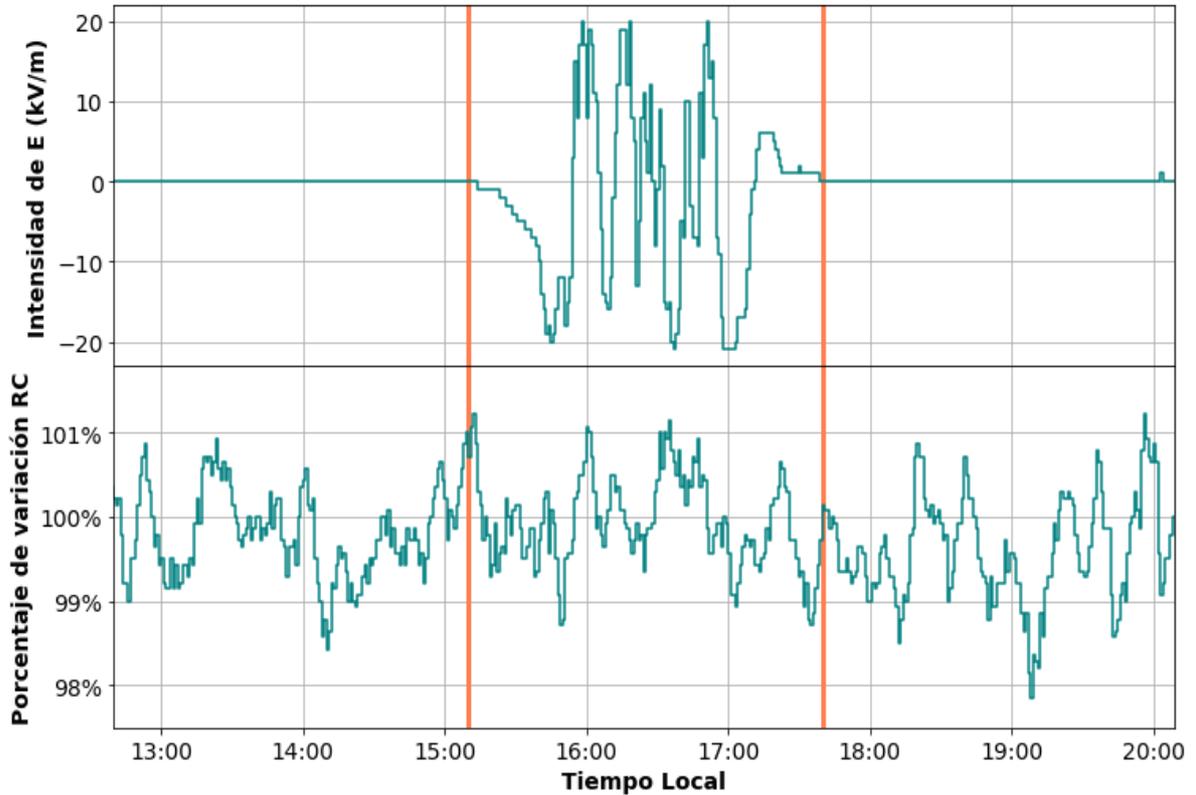


Figura 33. Gráficas comparativas para la tormenta del 26 de marzo del 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7, considerando como el 100% el promedio de los datos despojados del registro de la misma tormenta (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

Las figuras 34 y 35 tampoco mostraron ninguno de estos criterios para considerar el análisis significativo y utilizarlos de base para comparar con los resultados de la teoría de Dorman.

La ausencia de tendencias sistemáticas en los resultados de este análisis tampoco permite obtener conclusiones contundentes. Por este motivo, se realizó otro análisis estadístico, buscando un nuevo enfoque.

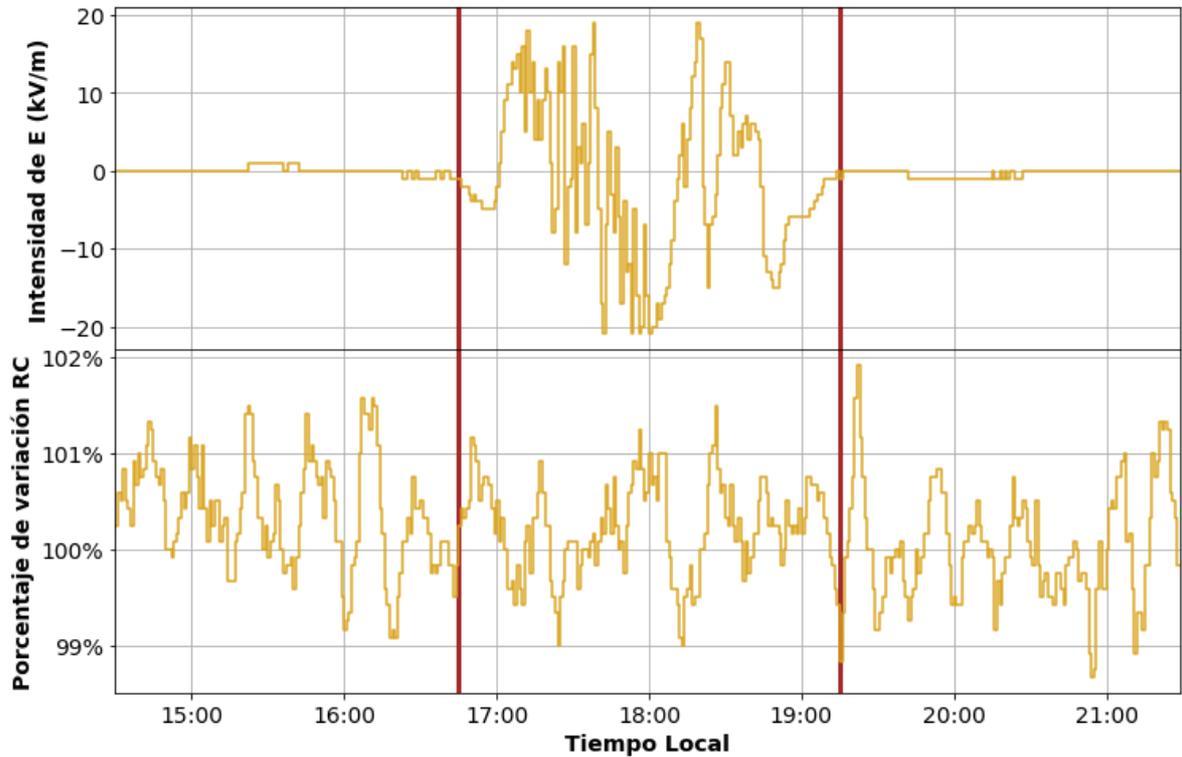


Figura 34. Gráficas comparativas para la tormenta del 5 de julio del 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7, considerando como el 100% el promedio de los datos despojados del registro de la misma tormenta (panel inferior). Las líneas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente.

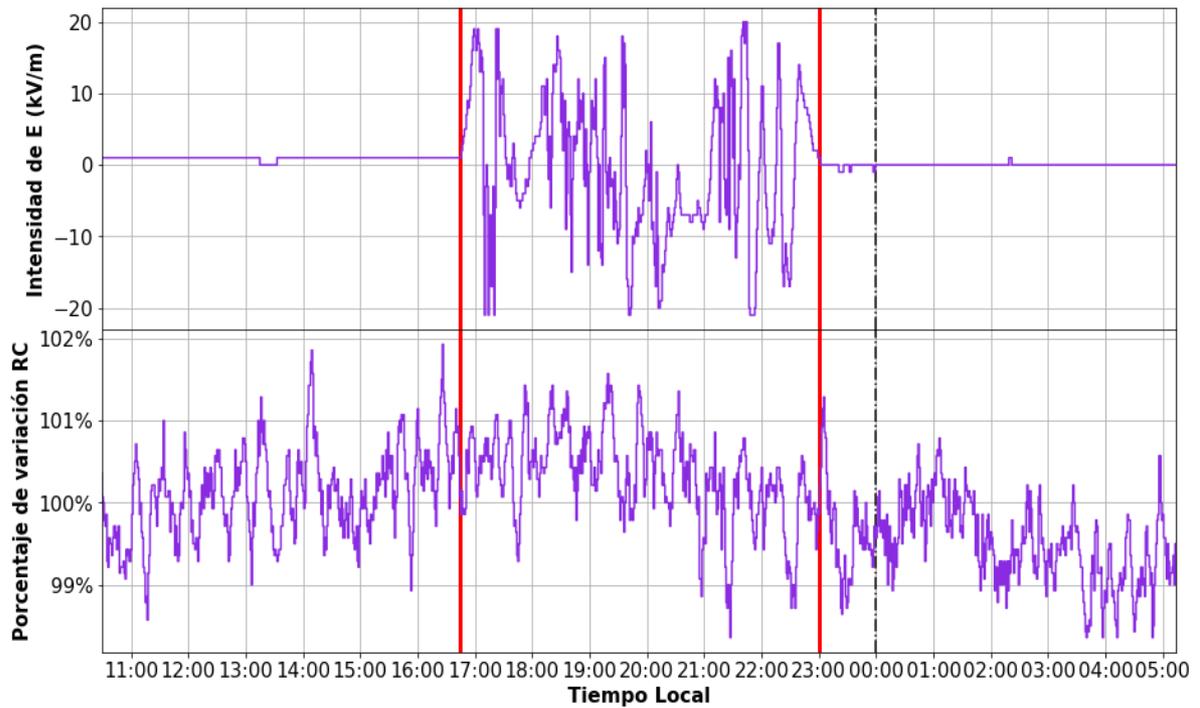


Figura 35. Gráficas comparativas para la tormenta del 18 de agosto del 2017 del **E** atmosférico en la CDMX (panel superior) y de las cuentas por min de la RC filtradas con una media móvil de 7, considerando como el 100% el promedio de los datos despojados del registro de la misma tormenta (panel inferior). Las líneas rojas representan el inicio y el fin de la tormenta respectivamente, mientras que la línea punteada representa el comienzo del siguiente día (19/08/17).

5.6 Análisis de épocas superpuestas

Para este análisis se utilizó el método de Chree de épocas superpuestas. El método de Chree se utiliza para detectar periodicidades dentro de una secuencia temporal o para revelar una correlación temporal entre dos secuencias de datos. El método también puede utilizarse para detectar una señal presente en varias secuencias temporales de datos en la presencia de ruido. Sin embargo, este análisis estadístico se emplea principalmente para inferir de qué manera influye un fenómeno físico limitado en el tiempo sobre otro fenómeno físico permanente. En este caso el fenómeno limitado en el tiempo es una tormenta eléctrica mientras que el fenómeno permanente es la incidencia de rayos cósmicos en la Tierra.

El método de épocas superpuestas está constituido por tres pasos bien estructurados. Primero se debe definir la ocurrencia de un evento dentro de una secuencia temporal de datos como el “tiempo clave”. Posteriormente se deben extraer subsets de datos de otra secuencia temporal definida en un rango de tiempo cercano al tiempo clave. Por último se deben superponer todos los subsets de datos extraídos con los tiempos clave de cada secuencia sincronizados.

Se realizó una selección nueva de tormentas eléctricas aisladas donde fueron consideradas únicamente las tormentas para las cuales no existe actividad eléctrica durante las 72 horas anteriores y posteriores a la tormenta. Bajo este nuevo criterio, se encontraron cinco tormentas. Las tormentas que cumplieron con los requisitos fueron agrupadas en la Tabla 3.

Fecha (2017)	Duración (hrs)	Intervalo de duración (Tiempo local)	Valor máximo de E (kV/m)	Valor mínimo de E (kV/m)
6 de abril	9	14:30-23:30	19	-19
13 de abril	3.75	19:30-23:15	19	-20
2-3 de junio	3.75	20:30-00:15	20	-20
23 de julio	3.75	15:30-19:15	16	-20
31 de octubre-1 de noviembre	4	20:30-00:30	20	-20

Tabla 3. Datos de las únicas tormentas eléctricas aisladas del 2017.

Se definió una unidad de tiempo, llamada Unidad de Tiempo de Tormenta (UTT) para cada una de estas tormentas eléctricas de manera que corresponda a su duración temporal. Por ejemplo, para la tormenta del 6 de abril del 2017 se estableció una $UTT=9$ hrs y para la tormenta del 13 de abril el $UTT=3.75$ hrs. Se utilizó un intervalo de tiempo t_0 , que corresponde al periodo real de duración de cada tormenta, que para la tormenta del 06/04 sería desde las 14:30 hasta las 23:30, es decir un UTT. Para cada tormenta a analizar, se utilizaron 5 t antes y después; de este modo, se analizaron datos de t_{-5} hasta t_5 .

Para la tormenta del 6 de abril, se utilizaron datos desde las 17:30 del 4 de abril hasta las 20:30 del 8 de abril. El criterio de selección para este análisis asegura que durante estos días solamente existió la ocurrencia de una tormenta eléctrica.

Una vez definidos estos intervalos de tiempo para cada tormenta, se recuperaron los datos registrados por el monitor de neutrones del ORCCM para los días que corresponden al rango de t_{-5} - t_5 . Entonces, se aplicó un filtro de medias móviles de 7, se calculó el promedio en la intensidad de RC ponderado por su respectivo UTT. Posteriormente, se calculó el promedio global de cada intervalo de tiempo para todas las tormentas (Intensidad Global Promedio). Considerando el promedio global de todo el conjunto de datos, al cual se le asignó el 100%, se encontró el porcentaje de variación para cada intervalo. Los datos analizados para cada tormenta se muestran la tabla 4.

Con los datos de la última columna de la tabla 4 se presenta una gráfica que muestra la tendencia global de la intensidad de RC en tiempos de tormenta (ver figura 36). Se observa que los datos fueron agrupados para generar una figura global que muestre las variaciones y tendencias de las cuentas de RC en tiempos de tormenta.

La figura 36 muestra la gráfica representativa de los resultados obtenidos tras el tratamiento estadístico conocido como método de Chree que fue aplicado a los datos registrados durante tormentas eléctricas intensas y aisladas por el monitor de neutrones 6-NM64. Los detalles de estas tormentas se encuentran en la tabla 3.

Intervalo de tiempo	Promedio ponderado para cada tormenta					Promedio global ponderado	Porcentaje de variación
	6 de abril	13 de abril	2-3 de junio	23 de julio	31 de octubre-1 de nov.		
t_5	153.44	371.65	367.68	364.82	348.07	321.13	100.08
t_4	154.13	371.31	366.68	364.38	347.38	320.78	99.97
t_3	153.74	371.00	367.86	364.16	346.71	320.69	99.94
t_2	153.39	371.70	367.11	364.25	346.19	320.53	99.89
t_1	152.89	370.75	367.81	366.40	347.62	321.09	100.07
t_0	153.33	370.94	366.62	367.11	348.89	321.38	100.16
t_{-1}	152.90	370.98	367.64	367.45	347.54	321.30	100.13
t_{-2}	152.80	371.90	367.22	366.45	348.03	321.28	100.13
t_{-3}	152.97	371.74	366.76	365.65	346.68	320.76	99.96
t_{-4}	153.00	371.31	366.79	365.35	346.24	320.54	99.90
t_{-5}	152.87	369.13	366.13	366.19	346.34	320.13	99.77

Tabla 4. Datos calculados para el análisis de épocas superpuestas de las tormentas eléctricas aisladas del 2017.

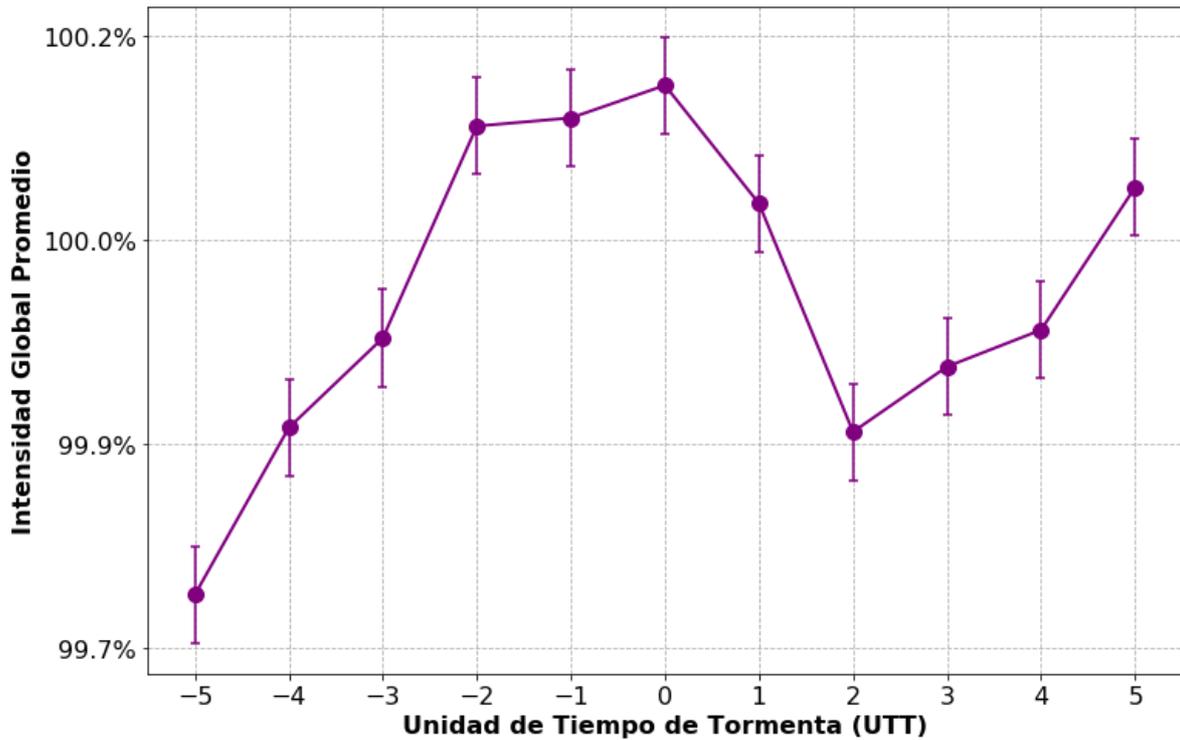


Figura 36. Gráfica del análisis de épocas superpuestas para las 5 tormentas eléctricas aisladas del 2017. Considerando una UTT como la duración respectiva de cada tormenta. La intensidad global promedio fue ponderada para cada UTT.

En la figura 36 se muestra la relación entre el porcentaje de variación de la intensidad global promedio pesada por cada UTT, en función de cada intervalo temporal desde t_{-5} hasta t_5 . En esta figura, t_0 representa el tiempo de inicio de todas las tormentas y se observa un incremento consistente durante los primeros cinco intervalos de tiempo previos a una tormenta eléctrica. Precisamente se alcanza un máximo en el tiempo de inicio de la tormenta (t_0). Posteriormente se aprecia una caída en la intensidad que comienza en t_0 y encuentra un mínimo en t_2 , a partir del cual la intensidad comienza a recuperarse. Esta caída fue de **0.26%** y representa la variación global de las cuentas de rayos cósmicos atribuidas a los campos eléctricos atmosféricos en tiempos de tormentas intensas y aisladas. Es posible explicar esta caída del 0.26% con base en la teoría de Dorman y los cálculos que se muestran en la sección 5.1.1.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser explicados por diversos factores que, debido a las circunstancias durante el desarrollo del mismo, fueron desfavorables para encontrar evidencia de un efecto significativo de los campos eléctricos atmosféricos generados por tormentas. Estos factores serán descritos en esta sección y se establecerá su importancia.

En el análisis de datos realizado en la sección 5.2 no fue posible observar una tendencia sistemática evidente en el conteo del monitor de neutrones 6-NM64 instalado en el ORCCM. Esto se atribuye en parte a que las señales de muy alta frecuencia, conocidas como ruido blanco, tienen una influencia significativa en el resto de los datos.

En la sección 5.3, se decidió utilizar un filtro estadístico de medias móviles centradas, para descartar los efectos del ruido blanco. Sin embargo, de igual manera no se logró observar ningún patrón de fluctuaciones sistemáticas para los datos del monitor 6-NM64 para ninguna de las tormentas seleccionadas.

El análisis de regresión lineal fue utilizado para representar gráficamente la más mínima tendencia que se encontrara dentro de los datos, sin embargo, tampoco fue significativa e incluso podría considerarse inexistente. Además, el error mínimo cuadrático fue muy alto para todas las tormentas.

La normalización del promedio de los datos registrados cuando la CDMX presentó condiciones de buen tiempo con respecto a los tiempos de tormenta, método estadístico frecuentemente utilizado para observar fluctuaciones sistemáticas; el cual fue desarrollado en la sección 5.5, tampoco arrojó los resultados esperados.

Un aspecto desfavorable para encontrar evidencias de la influencia del **E** atmosférico fue que para los intervalos de tiempo elegidos durante los cuatro primeros análisis no se descartaron períodos de tormentas consecutivas por lo que no se pudo construir un patrón de fluctuaciones para comparar tiempos quietos con tiempos de tormenta. A excepción de la tormenta del 6 de abril, todas las tormentas pertenecían a una serie de tormentas que se extendía por varios días. Posiblemente, los efectos de otras tormentas con una intensidad considerable impidieron encontrar señales de larga duración en el monitor de neutrones.

En la sección 5.6, se desarrolló un análisis de épocas superpuestas (método de Chree), donde se consideraron tormentas aisladas para eliminar los posibles efectos de tormentas subsecuentes. También, se decidió definir una unidad de tiempo de tormenta (UTT) que representa la duración temporal de cada tormenta aislada y que permite agrupar las tormentas seleccionadas de forma global; además, elimina la posible influencia de los datos registrados obtenidos durante tormentas de mayor duración sobre tormentas de menor duración. Con el análisis de épocas superpuestas se obtuvieron resultados más tangibles.

La figura 35 muestra una tendencia sistemática, para 5 tormentas, donde la intensidad global de las cuentas de neutrones disminuye hasta llegar al intervalo de tiempo t_2 . Se aprecia a su vez un incremento consistente en los intervalos de tiempo previos a la tormenta que llega a un máximo en t_0 . Las barras de error muestran pequeñas variaciones que no son comparables con el porcentaje de variación calculado.

Con base en la Teoría de Dorman, tomando en cuenta varios parámetros atmosféricos y un campo eléctrico con intensidad entre 10-20 kV/m, se estima una variación de 0.27-0.81% en la intensidad de la RC secundaria detectada por cualquier monitor de neutrones. Para los resultados mostrados en la figura 36, la variación fue de **0.26%**, la cual cae ligeramente fuera del rango inferior de los cálculos hechos por Dorman.

Para explicar las razones por las que se obtuvo dicho resultado, se deben comprender los procesos físicos que se explican a continuación. Los muones negativos son las únicas partículas cargadas de la componente secundaria de la RC que pueden ser detectadas indirectamente por un monitor de neutrones, como se discutió en la sección 4.3. Se sabe que las partículas cargadas del chubasco atmosférico se ven aceleradas por la presencia de un campo eléctrico generado por una tormenta. Debido a esto, los resultados obtenidos por los análisis realizados en este trabajo pueden atribuirse, en parte, a que para alturas de aproximadamente 3 km, la tasa de conteo causada por los muones negativos es varias veces menor que los registros a nivel del mar. La CDMX se encuentra a 2.25 km de altura y los detectores utilizados también, por lo que la tasa de conteo debida a los muones negativos es significativamente menor al 7% [25].

Además, recordando la discusión llevada a cabo en la sección 1.5, se sabe que para profundidades atmosféricas mayores la componente dura de la RC secundaria tiene una intensidad varias órdenes de magnitud mayor que la intensidad de la componente nucleónica. La CDMX se encuentra a una profundidad atmosférica de 790 g/cm²; de este modo, el flujo de la componente dura a este nivel es mayor que el flujo de la componente nucleónica.

La tasa de conteo de un monitor de neutrones causada por la reacción con los muones negativos es directamente proporcional a la intensidad de la componente muónica de la RC secundaria e inversamente proporcional a la componente nucleónica de la misma. Aunado a esto, existe otro factor que debería favorecer la obtención de evidencia del efecto del **E** atmosférico en condiciones de tormenta sobre la tasa de conteo del monitor de neutrones del ORCCM, debido a sus coordenadas geográficas. En latitudes cercanas al Ecuador la rigidez umbral incrementa de acuerdo a la explicación de la sección 1.4.1. Mientras la rigidez umbral aumenta, la intensidad de la componente muónica decrece ~10%, mientras que la componente nucleónica decrece ~50%. Esto significa que el porcentaje de pulsos obtenidos por el monitor como consecuencia de los muones negativos debe incrementar ~40% comparando latitudes cercanas a los polos con latitudes cercanas al Ecuador [25].

Otro aspecto que influyó de manera significativa en que los resultados estuvieran cercanos a los propuestos por Dorman fue el desarrollo del trabajo durante el año 2017; el cual, retomando lo mencionado en la sección 1.3.1, es un año muy próximo al mínimo del ciclo de actividad solar. Desde el máximo hasta el mínimo del ciclo solar, la intensidad de la componente muónica de la RC secundaria se ve reducida ~6%, mientras que para la componente nucleónica la intensidad decrece ~20%.

Los resultados de la presente tesis establecen varios parámetros que se deben tomar en cuenta para la búsqueda de evidencia del efecto de los campos eléctricos producidos por una tormenta que se desarrolle precisamente en la CDMX. Se obtuvo un porcentaje de variación, basado en datos confiables, que puede ser atribuido a la influencia de los procesos físicos descritos en esta sección.

Con base en los resultados de Dorman [24], se pueden detectar los efectos de los campos eléctricos atmosféricos utilizando registros de partículas cargadas. Debido a esto, para un mejor análisis con resultados más significativos y concluyentes, es recomendable utilizar los registros de rayos cósmicos secundarios cargados.

Otra sugerencia para el trabajo a futuro es utilizar el registro de datos durante el ciclo completo de actividad solar, con el objetivo de corroborar el comportamiento de la RC secundaria.

REFERENCIAS

- [1] Wilson, C. T. R. *The Acceleration of β -particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds*. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 22, 4, 534-8. 1925.
- [2] Lidvansky, A. S. *The effect of the electric field of the atmosphere on cosmic rays*. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 29, 5, 925–937. 2003.
- [3] García Gínez, R., Anzorena Méndez, M.A. *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para el Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria*. Tesis digital, Universidad Nacional Autónoma de México. 2011.
- [4] González Méndez, L. X. *Efectos de los campos eléctricos atmosféricos en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre*. Tesis digital de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 2003.
- [5] <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/ACENews83.html> Revisado el 14/06/17. ACE News #83, 2004.
- [6] Gómez Albarracín, F. A. *Estudio de la composición de rayos cósmicos de ultra alta energía en el Observatorio Pierre Auger*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2011.
- [7] Imagen modificada en 12/08/2017 de: [http:// astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/ Cosmic+Ray+Energies](http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Cosmic+Ray+Energies)
- [8] Cordero Tercero, M. G. et al. *Introducción a la física espacial*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [9] Álvarez Castillo, J. *Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre*. Tesis digital de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 2008.
- [10] Imagen recuperada en 21/06/17 de <http://floridawildlifecorridor.org/the-marsh-in-august/>
- [11] Cotton, W., Bryan G., van den Heever, S. *International Geophysics*. Volume 99: Storm and Cloud Dynamics, 2. 315-454. Academic Press, 2010.
- [12] Houze, R. A. *International Geophysics*. Volume 104: Cloud Dynamics. 187-236. Academic Press, 2014.
- [13] Kelley, M. C. *The Earth's Electric Field: Sources from Sun to Mud*. 29-52. Elsevier, 2013.
- [14] Leblanc, F., Aplin, K.L. Yair, Y., Harrison, R.G., Lebreton, J.P., Blanc, M. *Planetary Atmospheric Electricity*. Springer Science+Business Media. Previously published in Space Science Reviews Volume 137, Issues 1–4, 2008
- [15] Iribarne J. V., Cho H.-R. *Atmospheric Physics*. 129-146. D. Reidel Publishing Company, 1980.
- [16] Imagen recuperada en 22/03/18 de https://www.youbioit.com/es/article/18216/tipos-de-rayos?size=_original

- [17] Imagen recuperada en 23/07/17 de <https://ipmarket.cl/categoria-producto/tormentas-electricas/detector-de-campo-electrostatico-efm100/>
- [18] Monterde Andrade Fernando. *Puesta en marcha y calibración de equipo de monitoreo de campos eléctricos atmosféricos y primeros análisis de datos*. Tesis digital de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [19] *Boltek EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor: Installation/Operator's Guide*. Boltek Corporation. 2004-2015.
- [20] Wåhlin, L. *Atmospheric Electrostatics*. Research Studies Press. Letchworth, Hertfordshire, England. Colutron Research Corp. 1989.
- [21] Sitio web: Grupo de Rayos Cósmicos, departamento de Ciencias Espaciales. Instituto de Geofísica, UNAM.
http://naolinco.geofisica.unam.mx/observatorios/rayos_cosmicos/grupo_raycos/historiaobservatoriocu.html
- [22] *Neutron monitor database*. Unión Europea. <http://www.nmdb.eu/?q=node/380>
- [23] García Gínez, R. *Estimación del Espectro de Alturas de Pulsos con corrección del efecto apilamiento para el Monitor de Neutrones 6NM – 64*. Tesis digital de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [24] Dorman, L. I. and I. V. Dorman. *Cosmic-ray atmospheric electric field effects*. Canadian Journal of Physics, 73, 440443. 1995.
- [25] Dorman, L. I. and I. V. Dorman. *Possible influence of cosmic rays on climate through thunderstorm clouds*. Advances in Space Research, 35, 476-483. 2005.