



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**PUESTA EN MARCHA Y CALIBRACIÓN DE
EQUIPO DE MONITOREO DE CAMPOS
ELÉCTRICOS ATMOSFÉRICOS Y
PRIMEROS ANÁLISIS DE DATOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(CIENCIAS ESPACIALES)**

P R E S E N T A:

FERNANDO MONTERDE ANDRADE



DIRECTOR DE TESIS:
DR. LUIS XAVIER GONZÁLEZ MÉNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2017



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.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno:

Monterde
Andrade
Fernando
56921775
Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra (Ciencias
espaciales)
311146031

2. Datos del tutor:

Dr. Luis Xavier
González
Méndez

3. Datos del sinodal 1:

Dr. Mario
Rodríguez
Martínez

4. Datos del sinodal 2:

Dra. Maria
Sergeeva

5. Datos del sinodal 3:

Dr. Óscar Gustavo
Morales
Olivares

6. Datos del sinodal 4:

Dra. Marni Margarita
Pazos
Espejel

7. Datos del trabajo escrito:

Puesta en marcha y calibración de
equipo de monitoreo de campos
eléctricos atmosféricos y primeros
análisis de datos
59
2017

A MIS PADRES

Con especial aprecio a mi madre, Ernestina Andrade Prado, por su apoyo, educación y apoyo incondicional, sin lo cual esto no habría sido posible. Gracias por todo.

A mi padre Fernando Monterde Ramírez, por ser una pieza clave en mi formación personal.

A TODA MI FAMILIA

Con especial mención de mis abuelos, que en paz descansen: Agustina Ramírez García, José Andrade Cervantes “Pirú” y Teresa Prado Cerda.

A mi hermana Carmen Marielle Monterde Andrade, para que este gran paso la motive a superarse en todo aspecto.

A mis primos, Carolina Salazar Andrade y su esposo Rafael Rosas, así como a sus hijos y a sus padres, por todo el apoyo que han dado a mi familia.

A mi tía Carmela Ramírez García y a sus hijos, por el apoyo y amor incondicional que siempre nos han demostrado.

A TODOS MIS AMIGOS Y AMIGAS

Porque tengo la fortuna de tener una lista de nombres demasiado extensa, por ser mi segunda familia y el mayor regalo en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Luis Xavier González Méndez, por su asesoría durante mis estudios de licenciatura, por impulsarme y motivarme a continuar con mi carrera científica y por toda su valiosa ayuda en mi formación profesional. Muchas gracias.

A los miembros del jurado, por aceptar el compromiso y responsabilidad de revisar mi trabajo, así como a sus acertados comentarios y todo el valioso tiempo que le dedicaron.

Al Dr. Mario Rodríguez Martínez, a la Dra. Maria Sergeeva, al Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares, y a la Dra. Marni Margarita Pazos Espejel, les agradezco enormemente.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por todas las puertas que me abrió durante mis estudios.

A todas las personas que contribuyeron, ya sea directa o indirectamente, a donde me encuentro actualmente, pues este no es un trabajo de una sola persona, a todos los involucrados, de corazón, muchas gracias.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la reinstalación del equipo Boltek EFM-100, un dispositivo capaz de monitorear y detectar variaciones en la intensidad de los campos eléctricos atmosféricos. Mediante un proceso de calibración, el detector se reinicializó y se tienen datos estables y de confianza para su análisis e investigación científica. El uso de esta nueva base de datos estará orientada a los estudios relacionados con las variaciones atmosféricas de las cuentas de rayos cósmicos que llegan a los detectores a nivel de tierra. Además, sus registros también pueden ser utilizados en las ciencias atmosféricas.

En el presente trabajo, se da una introducción de lo que son los rayos cósmicos, las distintas componentes y su paso a través de la atmósfera terrestre.

En el capítulo 1 se explica el proceso de formación de tormentas eléctricas, eventos de particular interés en el estudio de variaciones de la componente secundaria de los rayos cósmicos atribuidas a variaciones de los campos eléctricos. Este proceso debe comprenderse a fondo con el fin de conocer el mecanismo de detección del monitor de campos eléctricos.

En el capítulo 2 se plantean los principios físicos bajo los cuales opera el monitor de campos eléctricos Boltek EFM-100 y se da una descripción detallada de su funcionamiento.

En el capítulo 3 se describe el método de calibración empleado y se muestran los primeros resultados.

En el capítulo 4 se realizan los primeros análisis de los nuevos datos y se llevan a cabo comparaciones con los datos registrados antes del cese de operaciones del equipo, mostrando el éxito de la calibración.

Resumen	5
Índice	6
Introducción	8
1. Formación de tormentas eléctricas	15
1.1. Introducción	16
1.2. Formación de tormentas eléctricas	17
1.2.1. Evolución de las tormentas eléctricas	17
1.2.2 Distribución eléctrica en una tormenta eléctrica	18
1.2.3 Mecanismos de electrificación de nubes	20
1.2.3.1 El mecanismo de captura selectiva de iones	20
1.2.3.2 Carga inductiva de partículas en colisión	21
1.2.3.3 Métodos no inductivos	21
1.2.3.4 Electrificación por corrientes externas	21
1.3 Tormentas eléctricas dentro del circuito eléctrico global	22
1.4 Registro de las tormentas eléctricas.....	23
2. Monitor de campos eléctricos Boltek EFM-100.....	24
2.1. Introducción	25
2.2. Diseño del monitor de campos eléctricos Boltek EFM-100	27
2.3. Software y especificaciones del equipo	29
2.4. Funcionamiento del Boltek EFM-100	31
2.5. Teoría de operación	32
3. Calibración del Boltek EFM-100	38
3.1. Método de calibración	39
4. Análisis de los primeros datos	44
5. Conclusiones	54
Apéndice	56
Referencias	57

Introducción

Los rayos cósmicos (RC) son, en su mayoría, partículas ionizadas que consisten en núcleos atómicos, son el resultado de procesos de aceleración que despojan a los átomos de sus electrones, [1]. Son partículas que dominan el espectro de energía hasta 10^{21} eV y se clasifican en:

- **Solares.** Aquellas partículas energéticas aceleradas en las fulguraciones solares, también conocidas como SEP (Solar Energetic Particles, por sus siglas en inglés). Se emiten en el Sol debido al calentamiento del plasma, que genera aceleración y reacciones nucleares. La composición del flujo de partículas energéticas emitidas varía con cada fulguración. En la escala de la radiación cósmica, los rayos cósmicos solares (RCS) poseen energías relativamente bajas ($\leq 10^9$ eV).
- **Galácticos.** Los rayos cósmicos galácticos (RCG) provienen de fuera del Sistema Solar, pero generalmente del interior de la Vía Láctea. Fueron originados hace unos cuantos millones de años y atrapados por el campo magnético galáctico, han estado viajando en repetidas ocasiones a través de la galaxia, probablemente acelerados a velocidades cercanas a las de la luz por remanentes de supernovas. Conforme avanzan a través del tenue gas interestelar, algunos RCG emiten rayos gamma cuando interaccionan, de esta forma es que conocemos su paso a través de la galaxia. Dominan el espectro de energía entre $10^9 - 10^{16}$ eV.
- **Anómalos.** En el medio interplanetario, algunos átomos emitidos sufren la pérdida de uno de sus electrones por intercambio de carga y por fotoionización; de este modo, se forman iones (sin perder todos sus electrones) que se mueven con el viento solar. Al adquirir una carga neta, el campo magnético solar arrastra a estos iones recogidos o *pick up ions* hacia la onda de choque terminal del viento solar. Posteriormente, dichos iones colisionan repetidamente con la onda de choque, hasta que adquieren suficiente energía para escapar de ella y desviarse hacia la Heliósfera interior, aquellos iones que son acelerados de esta manera reciben el nombre de rayos cósmicos anómalos (RCA). Se sabe que los RCA incluyen grandes cantidades de He, O, Ne y otros elementos con altos potenciales de ionización, [2]. Los RCA sólo se pueden detectar en naves espaciales.

Los RCG, los cuales dominan el espectro de energía desde 10^9 hasta 10^{17} eV, son producidos en remanentes de supernovas, estrellas de neutrones, núcleos activos de galaxias, radio galaxias, etc. La composición de los RC es de ~93% de protones (núcleos de H), 6.3% de partículas alfa (núcleos de He) y 0.7% restante son núcleos de elementos más pesados (Li, Be, B, C, N, O, Fe). Adicionalmente, los RC también pueden ser partículas de antimateria, como es el caso de los antiprotones, partículas con energías cercanas a 1 GeV, [2, 3]. El espectro de la radiación cósmica (Figura 1) describe el flujo de partículas por unidad de energía que ingresa a la Tierra en determinados tiempo y área.

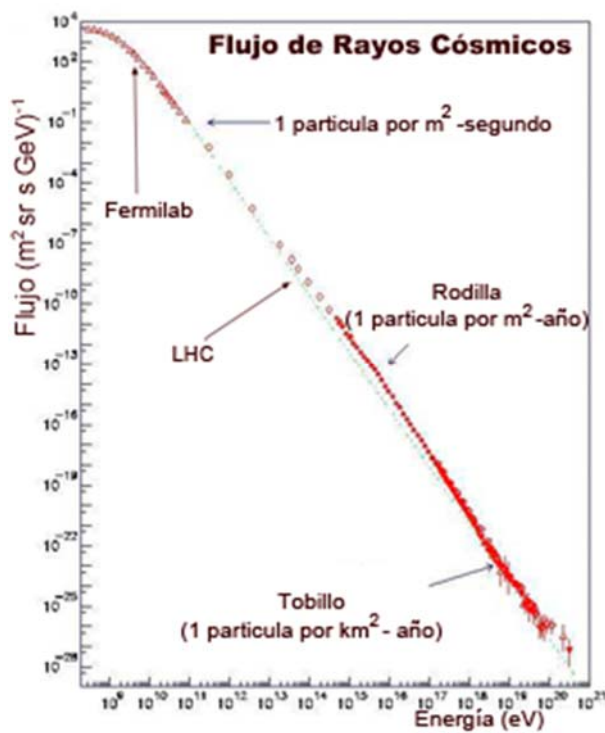


Figura 1. Espectro de energías de los rayos cósmicos. Tomada de [4].

La Heliosfera es responsable de la desviación de las partículas con energías que van desde los 10^9 eV hasta llegar a los 10^{15} eV, en la región del espectro conocida como “rodilla”, por debajo de esta zona, los RC galácticos son la contribución dominante. Las partículas con energías de $\sim 10^{15}$ - 10^{17} eV son probablemente aceleradas por mecanismos de choques rápidos como los remanentes de supernovas.

Las partículas con energías superiores son llamadas “de ultra alta energía”, poseen radios de giro comparables con el radio de nuestra galaxia, son muy poco abundantes en comparación a los RC galácticos y su fuente aún no está plenamente confirmada, debido a esto es que se les conoce como RC extra-galácticos. Alrededor de 10^{20} eV, el espectro comienza a aplanarse de nuevo, formando la región conocida como “tobillo”.

Se les llama RC primarios a las partículas que inciden sobre el tope de la atmósfera terrestre. Antes de que ocurra una interacción nuclear, un RC primario atraviesa una cantidad de materia por unidad de área de ~ 140 g/cm². Esto representa una probabilidad prácticamente nula de que un RC primario alcance la superficie de la Tierra, ya que la cantidad de materia en la atmósfera es de 1033 g/cm², [3].

Cuando los RC primarios (generalmente protones, por ser más abundantes) penetran en la atmósfera terrestre y colisionan con las partículas del aire. Estas colisiones pueden ser de dos tipos: contra la estructura electrónica de los átomos o contra sus núcleos. Las colisiones del primer tipo producen ionización de los átomos, y su efecto sobre la trayectoria de los RC es prácticamente despreciable, perdiendo 30 eV tras la colisión. Las colisiones del segundo tipo producen un fenómeno conocido como chubasco de partículas (Figura 2) y producen una cascada de partículas secundarias. Una colisión nuclear ocurrirá en promedio después de que una partícula incidente logre atravesar aproximadamente 80 g/cm² de aire ó 62 g/cm² de agua, [2].

Cuando un RC primario choca con un núcleo atómico en la atmósfera, produce un chubasco de partículas secundarias (rayos cósmicos secundarios). En esta interacción, se generan principalmente piones¹ neutros y con carga, cada uno de estos RC secundarios son capaces de colisionar y formar una mini cascada dentro del núcleo del chubasco de partículas inicial.

Los RC primarios ceden su energía a la atmósfera hasta el nivel del mar o incluso a niveles inferiores a través de tres componentes:

- *La componente nucleónica:* cuando una partícula primaria de baja energía colisiona y desintegra un átomo atmosférico se producen principalmente protones y neutrones, los cuales tendrán una energía menor a la de la partícula primaria, pero suficiente como para producir una nueva reacción nuclear al interaccionar

¹ Los piones son un tipo de mesón, partículas constituidas por pares de quarks y antiquarks de sabores *up* y *down* cuya vida media es muy corta.

con otros átomos atmosféricos como si fueran partículas primarias. Estos nucleones son lo que se conocen como componente nucleónica.

- *La componente muónica:* también llamada componente dura. En el caso de partículas de mayores energías, las interacciones nucleares no son elásticas, esto significa que la energía de la partícula primaria no es igual a la de los nucleones resultantes de la desintegración nuclear, ya que parte de esa energía se invierte en la formación de un nuevo tipo de partículas y en proveerles de la energía cinética con la que se alejan del punto de interacción. Las partículas generadas son kaones y piones. Los piones son inestables, los piones neutros decaen en dos rayos gamma, mientras que los cargados decaen en muones de la misma carga.
- *La componente electromagnética:* también llamada componente suave, está constituida principalmente por electrones y positrones resultantes del decaimiento de los muones positivos y negativos, por procesos de ionización, por producción de pares y de cascadas fotón electrón.

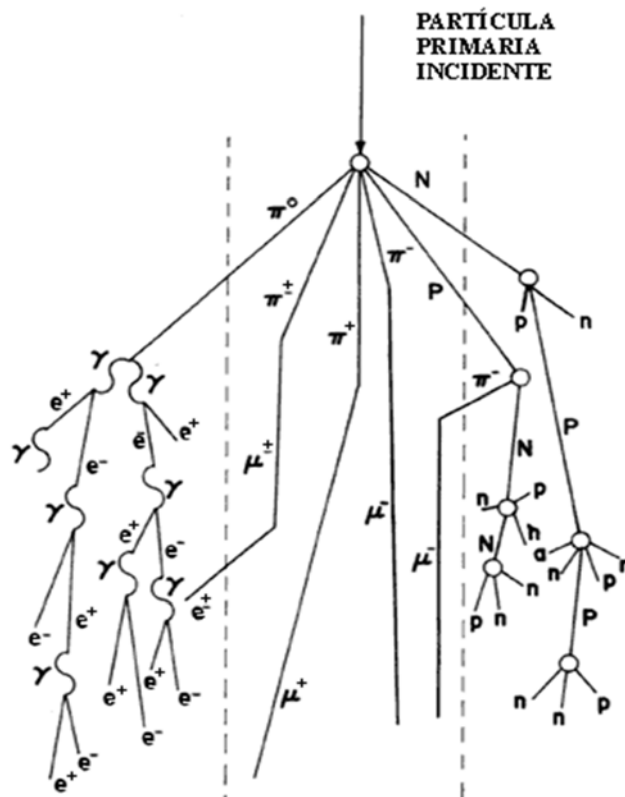


Figura 2. Esquema de un chubasco de partículas. Tomada de [5].

La composición de la radiación cósmica secundaria varía en función de los parámetros que intervienen en su interacción con las partículas atmosféricas. Las variaciones de las condiciones atmosféricas influyen en la intensidad de las partículas secundarias detectadas y pueden ser divididas en cinco clases: la temperatura, presión, gravedad, humedad y electricidad atmosférica. Para este trabajo, nos centraremos en la electricidad atmosférica.

El efecto de la electricidad atmosférica se fundamenta en la interacción del campo eléctrico atmosférico con las partículas de la componente secundaria de los RC, [2, 3, 6, 7]. Las variaciones de las partículas de la componente secundaria detectadas a nivel de tierra son atribuidas a los campos eléctricos atmosféricos y han sido estudiadas desde la segunda mitad del siglo pasado. Se han estructurado ecuaciones para describir este fenómeno; sin embargo, las observaciones no son del todo consistentes. Por lo tanto, una mayor resolución en las mediciones puede ayudar a estudiar estos fenómenos con mayor precisión. Para estudiar estas variaciones es necesario tener acceso a datos de observatorios de rayos cósmicos y datos de variaciones de la intensidad del campo eléctrico atmosférico.

Desde 1990, el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORCCM) mide la componente secundaria de los rayos cósmicos; sin embargo, actualmente no se tienen registros estables y de libre acceso a las variaciones de la intensidad de los campos eléctricos (\bar{E}) durante tormentas atmosféricas en la Ciudad de México. De este modo, el objetivo principal de este trabajo es la puesta en marcha, calibración y análisis de los primeros datos registrados por un detector de campos eléctricos (\bar{E}) atmosféricos que se instaló en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Los registros estables de las variaciones del \bar{E} atmosférico durante tormentas eléctricas servirán de base para realizar trabajos de investigación a futuro sobre la influencia de estos \bar{E} en la componente secundaria de los rayos cósmicos detectados por el ORCCM.

El \bar{E} atmosférico puede alcanzar una intensidad de 20 kV/m [8], esta intensidad es capaz de acelerar y desacelerar partículas de la componente secundaria. Se han observado pequeñas variaciones con periodos de 8 a 16 minutos en la intensidad de rayos cósmicos durante días con tormentas eléctricas, [9, 10]. Dorman (1995) concluyó que las variaciones de campo eléctrico durante una tormenta eléctrica son la principal causa de pequeñas variaciones en la intensidad de muones.

En [12], se realizó una parametrización de la ocurrencia de tormentas eléctricas y se graficó con respecto a la intensidad de rayos cósmicos (Figura 3) y se llegó a la conclusión de que la teoría de Dorman (1995), acerca de los efectos meteorológicos en la intensidad de RC, asume valores de la intensidad de los campos eléctricos por encima de los registrados en la Ciudad de México, o que estos campos no son uniformes en el tiempo y altura durante el desarrollo de una tormenta eléctrica. Por lo que el uso de un monitor de campos eléctricos hará posible la obtención de mejores resultados para el estudio de los efectos del campo eléctrico atmosférico en los rayos cósmicos, mejorando notablemente la calidad de los datos experimentales.

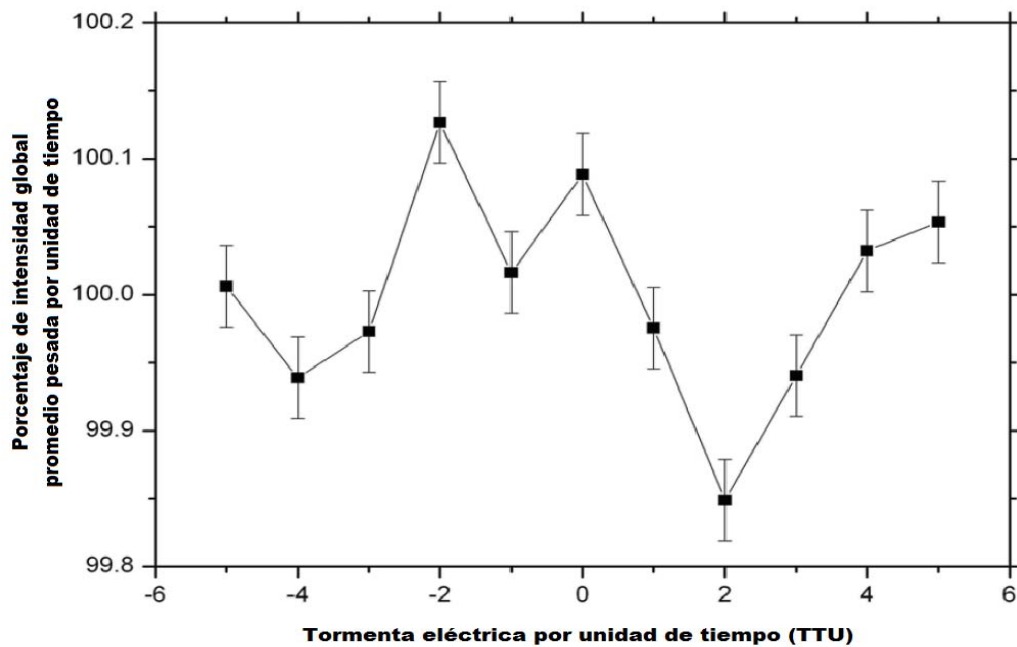


Figura 3. Porcentaje de intensidad de rayos cósmicos promedio por unidad de tormenta eléctrica. Se consideran todas las tormentas eléctricas en los años 1996 y 1997. Tomada de [11].

Se han realizado estudios donde se muestran variaciones en el flujo de RC detectados por equipos especializados, atribuidas a intensos campos eléctricos atmosféricos, presentando particular interés a los eventos de tormentas eléctricas, [12, 13].

En el capítulo 1 de la presente tesis, se realiza una descripción teórica del mecanismo que da lugar a la formación de tormentas eléctricas en la tropósfera de la Tierra, siendo éstas las fuentes de campo eléctrico de interés, así como de los fenómenos físicos involucrados. En el capítulo 2, se presenta el diseño, especificaciones y teoría de funcionamiento del monitor de campos eléctricos atmosféricos. Se incluyen los principios físicos bajo los que se sustenta la operación del dispositivo, así como información relevante para la interpretación de los datos. En el capítulo 3, se aborda el tema de la calibración, se lleva a cabo un estudio de casos para diferentes escenarios con tormentas eléctricas y sin ellas, mostrando los resultados de la calibración del detector.

Finalmente, en el capítulo 4, se da una interpretación a las lecturas que el monitor ha estado registrando desde su puesta en marcha. El análisis se efectúa para cada caso presentado en el capítulo 3.

Capítulo 1:

Formación de Tormentas Eléctricas

1.1. INTRODUCCIÓN

Para poder emplear el detector de campos eléctricos (\vec{E}) es necesario conocer y comprender las interacciones físicoquímicas que ocurren en la atmósfera y que intervienen en la formación de los \vec{E} . Una de las fuentes más importantes para la generación de \vec{E} en la atmósfera son las cargas que almacenan las nubes electrificadas y una de las principales fuentes de corriente son las tormentas eléctricas. Estas cargas producen efectos importantes en la ionósfera y en la región comprendida entre ella y la superficie de la Tierra. La intensidad de los \vec{E} generados puede depender de diferentes parámetros como son la conductividad del medio, la altitud de las nubes de tormenta y la cantidad de carga que es removida por rayos.

Más adelante se hará énfasis al mecanismo de generación de \vec{E} atmosféricos, en particular, de aquellos campos que son resultado de la formación de tormentas eléctricas.

Desde que se planteó por primera vez la posibilidad de que los electrones son acelerados por el \vec{E} de una tormenta eléctrica [7], se han realizado numerosos experimentos con el objetivo de determinar el efecto de los \vec{E} atmosféricos sobre los rayos cósmicos que llegan a la Tierra.

Utilizando el amplio conjunto de datos del Observatorio de Baksan [9], se logró encontrar una correlación entre las variaciones de corta duración de la componente secundaria de los rayos cósmicos, [13]. Años más tarde, se llevó a cabo una nueva versión del experimento que logró establecer una relación entre ambos fenómenos estudiando las variaciones cortas en la intensidad de los rayos cósmicos durante la ocurrencia de eventos de lluvia y tormentas eléctricas. La interpretación de los resultados señaló que había dos tipos de variaciones de rayos cósmicos: la primera fue una muy frecuente, asociada a una larga duración (del orden de minutos), la segunda ocurre con mucho menor frecuencia y tiene una duración mucho menor (del orden de milisegundos), [14]. El primer tipo de variación puede ser claramente asociada a los \vec{E} atmosféricos, siendo la intensa actividad eléctrica de una tormenta responsable de la aceleración o deceleración de las partículas. Sometidos a estos campos eléctricos tan intensos, los efectos secundarios sobre los electrones son muchos más susceptibles a ser observados. Por otro lado, se especula que el segundo tipo de variación se debe a electrones de fuga o *runaway electrons*, durante eventos de caída de rayos, [12, 13]. En general, la intensidad de la componente suave de los rayos cósmicos se incrementa debido al efecto de los \vec{E} , mientras que la componente dura sufre un decremento en su intensidad.

En [14], se señala la importancia de registrar información sobre la duración de las lluvias y/o la intensidad en la interpretación de resultados de este tipo de estudios.

Durante las tormentas, las variaciones de periodo corto en la intensidad de las componentes muónica y electromagnética de los rayos cósmicos cambian a las frecuencias más altas detectables en la información usada en su trabajo. Lamentablemente no poseían mediciones de \bar{E} a las cuales poder realizar análisis espectrales como los que se aplican a las series de rayos cósmicos, por lo que no pudo determinarse si las frecuencias de \bar{E} pudieron presentar resonancias o algunos otros efectos físicos. Así mismo, en [11] se considera fundamental contar con instrumentación adecuada que permita realizar mediciones de campo eléctrico atmosférico. Entre mayor sea la resolución y precisión de las mediciones, será posible aplicar mejores análisis.

1.2. FORMACIÓN DE TORMENTAS ELÉCTRICAS

Una tormenta eléctrica se define como una nube que produce descargas eléctricas (rayos), su formación normalmente se precede a la acumulación de nubes cumulonimbos, que son las formas más grandes de nubes convectivas y típicamente producen descargas eléctricas.

Las descargas eléctricas comienzan a aparecer cuando este tipo de nubes se desarrolla hasta alcanzar cerca de 10 km de altura, pero las tormentas eléctricas sólo se producen en nubes de crecimiento vertical o convectivas. Para que haya convección debe de existir un gradiente de temperaturas, para lo cual se requiere de una capa de aire caliente y húmedo debajo de una capa de aire frío y seco, [4].

1.2.1. Evolución de las tormentas eléctricas

El ciclo de vida de una tormenta (Figura 4) puede clasificarse en tres etapas [15]:

I. *Etapas de formación o de cúmulo:* la parcela de aire caliente y húmedo asciende con aceleración radial debido al calentamiento diferencial de la superficie, al disminuir la presión durante el ascenso, la parcela aumenta su volumen cuando el aire alcanza la saturación, conforme crece, más vapor de agua

se condensa, liberando calor latente de vaporización, el cual amplifica la convección. La nube continúa creciendo verticalmente a través de la tropósfera, cuando se sobrepasa el nivel de congelación, algunas gotas se congelan, mientras que otros pequeños cuerpos de agua son depositados sobre núcleos de condensación formando cristales de hielo, coexistiendo ambos tipos de cuerpos. Los cuerpos de agua crecen en la corriente y los más grandes atrapan a los más pequeños al moverse, algunos crecen lo suficiente como para que la corriente ascendente no pueda elevarlos, cayendo hacia a la superficie terrestre formando una corriente descendente.

II. *Etapa madura*: teniendo ambas corrientes, algunas de los pequeños cuerpos de agua sólida se funden nuevamente durante el descenso debido al incremento de temperatura, produciendo lluvia. El enfriamiento fortalece a la corriente descendente, que crece lateral y horizontalmente. La celda alcanza su máxima altura, hasta la región inestable, que suele ser el límite inferior de la estratosfera, provocando que la corriente ascendente se extienda lateralmente formando el “yunque”.

III. *Etapa de disipación*: empieza a penetrar aire frío en la parte superior de la nube, propiciando el crecimiento de la corriente descendente. Después se debilita debido a que las gotas sobreenfriadas se empiezan a congelar, liberando calor latente y disminuyendo la temperatura de la nube, con lo cual, comienza a desaparecer debido a la falta de calor latente adicional.

1.2.2. Distribución eléctrica en una tormenta eléctrica

Durante el desarrollo de la tormenta, los hidrometeoros, partículas de agua en estado líquido o sólido, son inicialmente neutros y posteriormente cargados. Una nube puede aproximarse como una pila vertical con tres centros de carga, está cargada positivamente cerca de su parte superior (cargas principales), y en menor magnitud en su parte inferior, mientras que existe un arreglo de cargas negativas en la parte media. Estas configuraciones corresponden a un dipolo y a un doble dipolo eléctrico, [16].

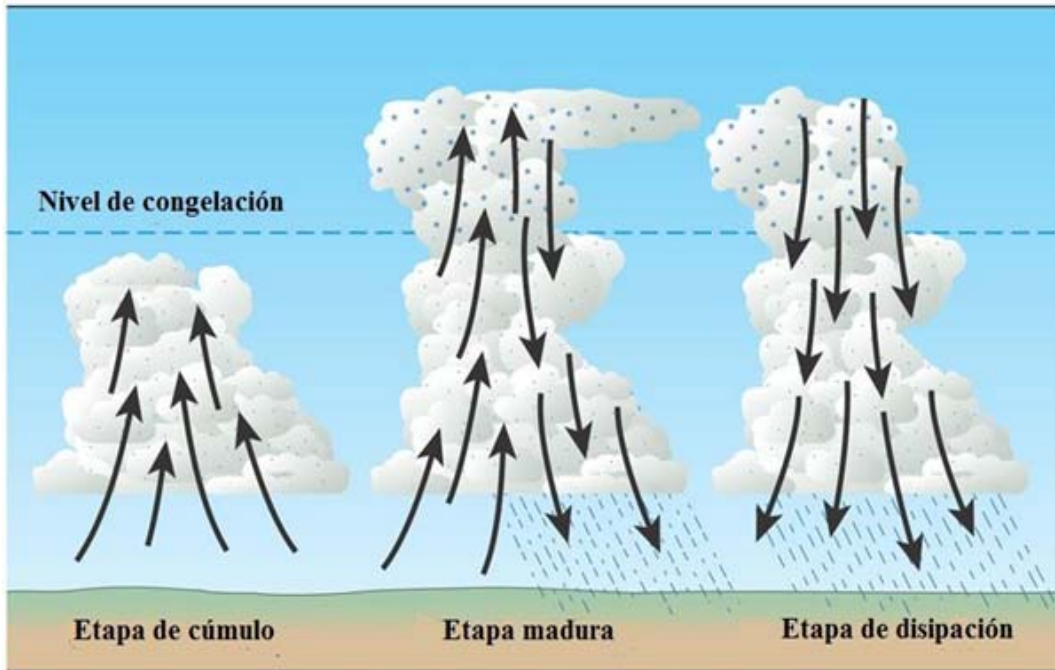


Figura 4. Esquema de las etapas de una tormenta eléctrica. Tomada de [17].

Las cargas que se forman en la nube de una tormenta eléctrica se acumulan debido a que el aire es un buen aislante, de manera que se producen enormes diferencias de potencial, intensificando los \vec{E} generados por estas cargas. Cuando el \vec{E} se intensifica, los electrones presentes en la atmósfera pueden ser acelerados a energías tales que pueden despojar a las moléculas de sus electrones, los cuales pueden colisionar con más moléculas, de tal manera que una gran cantidad de electrones es liberada en tan sólo algunos milisegundos. De este modo, una alta intensidad de corriente eléctrica es capaz de fluir desde la nube hacia la superficie terrestre, de una nube a otra, entre el tope y centro de una misma nube (intranube), o de la nube al aire (Figura 5). Conforme los electrones se acercan a tierra, se forma un flujo de electrones guía, mientras que objetos como los árboles emiten un flujo positivo que se une a la trayectoria del flujo guía, neutralizando la carga y provocando la descarga eléctrica. A medida que chocan con átomos y moléculas de aire, los electrones absorben energía y son excitados, por lo que emiten fotones para regresar a su estado base, dando origen a los relámpagos, [2, 3, 18, 19, 20].

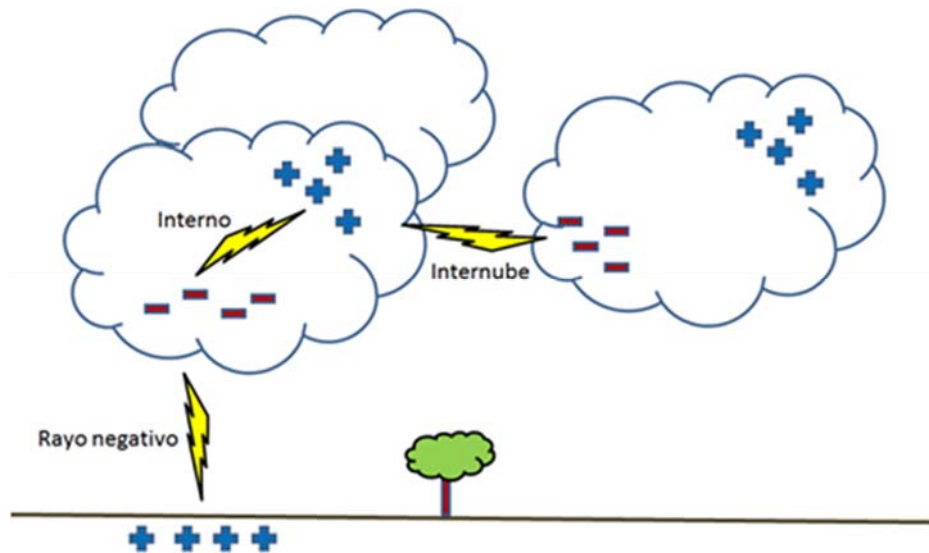


Figura 5. Esquema de los tipos de descargas eléctricas. Tomada de [21].

1.2.3. Mecanismos de electrificación de nubes

Cuando existe un calentamiento máximo en la atmósfera, el aire se vuelve inestable, promoviendo la convección en la tormenta, la mayoría de las tormentas eléctricas ocurren bajo estas condiciones. Normalmente, las tormentas eléctricas tienen varias celdas, que pueden estar en etapas diferentes, el desarrollo de subsecuentes celdas puede ser influenciado por una región de convergencia entre el flujo de aire caliente y el aire del medio ambiente que puede propiciar la formación de nuevas celdas, [3] [4].

1.2.3.1. El mecanismo de captura selectiva de iones

Este mecanismo parte de las gotas de agua en la nube, que al precipitarse pueden comenzar a polarizarse en un campo eléctrico. Si al polarizarse interaccionan con los iones que se mueven bajo la influencia del campo eléctrico y el viento, los iones negativos (aniones) serán capturados en la parte baja de la gota. La velocidad de caída de los iones debe ser menor a la de las gotas, en caso contrario, los iones de la misma polaridad pueden ser capturados en la parte superior de la gota. De esta forma la carga neta de la gota puede ser reducida o neutralizada. Si los iones positivos son lentos, no serán capturados. Como las gotas ganan carga por la captura selectiva de iones, eventualmente el campo no será capaz de polarizar la gota.

En la mayoría de las regiones de las tormentas eléctricas con precipitación, las densidades de iones son insuficientes para permitir que la carga por captura selectiva sea significativa a la electrificación [22], lo cual sugiere que la probabilidad de producir tormentas eléctricas por este mecanismo en ausencia de otros es baja.

1.2.3.2. Carga inductiva de partículas en colisión

Sugiere la colisión de dos gotas polarizadas por el \vec{E} del medio ambiente, cuando chocan con una gota de la corriente descendente, una porción de la carga en la parte baja de la gota que cae será transferida a la partícula de la nube. Si la gota de la nube rebota, la carga de su parte superior se anulará con la carga de la parte inferior de la gota mayor. El tiempo de contacto debe ser suficiente para que la carga pueda fluir de una gota a otra. Así mismo, la conductividad de las partículas debe ser lo suficientemente alta para que la transferencia de carga sea efectiva durante el tiempo de contacto.

1.2.3.3. Mecanismos no inductivos

Son aquellos que no requieren de la polarización de las gotas o hielos por un campo eléctrico. Por ejemplo, en el mecanismo *graupel-hielo* la separación de carga a través de la interfase agua-hielo de agua congelada sería responsable de la electrificación en tormentas eléctricas cuando se forman los cuerpos sólidos que se precipitan. Aquí, la carga se separa por colisiones de los cristales de nieve con gotas de agua y con otros cristales amorfos de nieve y partículas de hielo, [23]. Este mecanismo depende de la temperatura, del contenido de agua líquida y del tamaño de los cristales de hielo con que chocan, [24]. A temperaturas cercanas a 0°C , sin importar la cantidad de agua líquida, los cristales se cargan positivamente.

1.2.3.4. Electrificación por corrientes externas

Una corriente eléctrica que fluye a través de la frontera de las nubes genera una capa de carga en la frontera, [17, 19]. Su formación es independiente de las partículas dentro de la nube que estén siendo polarizadas por el campo eléctrico. En este modelo, el medio ambiente tiene una carga espacial positiva que es arrastrada por las corrientes ascendentes dentro de las nubes y es atrapada por diferentes cuerpos como gotas, la carga espacial

resultante forma una capa negativa sobre la frontera de la nube, que puede ser transportada a la parte baja de la tormenta y dentro de la nube puede atraer más carga positiva desde abajo.

1.3. TORMENTAS ELÉCTRICAS DENTRO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL

La Tierra tiene una carga eléctrica neta negativa de aproximadamente 10^6 Coulomb. En la atmósfera (tomando en cuenta la atmósfera inferior, la ionósfera y la magnetósfera), la carga eléctrica neta es positiva y tiene la misma magnitud, actuando como un enorme capacitor, entre la superficie de la Tierra y la atmósfera existe un flujo de corriente, dando lugar al Circuito Eléctrico Global (Figura 6).

La electrósfera es una región de la atmósfera a una altitud de aproximadamente 48 km en la que existen partículas ionizadas, por lo que la resistividad se mantiene más o menos constante. Entre este espacio y la superficie terrestre existe una diferencia de potencial de 3×10^5 V, con lo que se tiene un \vec{E} de aproximadamente 6 V/m en la atmósfera y 100 V/m cerca de la superficie terrestre, [3].

Entre la electrósfera y la superficie terrestre existe una corriente eléctrica constante en el tiempo de cerca de 2×10^3 Amperios, debido a que la atmósfera no está completamente aislada y esto permite el ascenso de carga negativa hacia la electrósfera, a esto se le llama corriente de buen tiempo eléctrico. La Tierra vuelve a ser cargada negativamente gracias a las tormentas eléctricas, que producen alrededor de 50-100 descargas eléctricas por segundo desde las nubes hacia la superficie, siendo las principales fuentes de carga en la baja atmósfera.

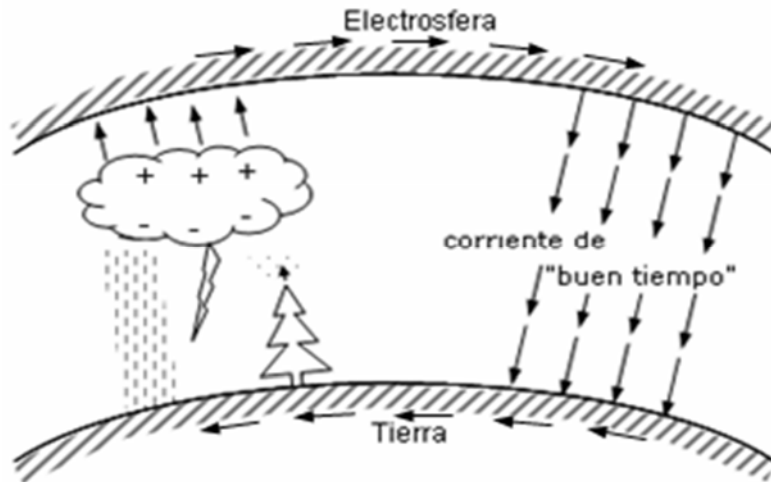


Figura 6. Esquema del Circuito Global Eléctrico. Tomada de [25].

1.4 REGISTRO DE LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS

El registro continuo de la variación de los \bar{E} atmosféricos ha permitido desarrollar bases de datos utilizando diferentes métodos. En [9], se menciona el uso de detectores en globos que ascienden a la estratósfera y miden la intensidad de los \bar{E} en función de la altura. Además, existen detectores de tipo molino, por ejemplo, el Boltek EFM-100, que operan a nivel de la superficie terrestre; en el siguiente capítulo se hablará detalladamente de este tipo de detectores.

Actualmente, existen distintas instituciones que manejan equipos de detección y bases de datos atmosféricos. Dentro de la UNAM, el Centro de Ciencia de la Atmósfera (CCA) es el encargado de la administración de una red de detectores de \bar{E} y estaciones meteorológicas llamada "Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos" (RUOA), distribuida en diferentes puntos de la República Mexicana.

Capítulo 2:
Monitor de campos eléctricos Boltek
EFM-100

2.1. INTRODUCCIÓN

La forma de operar del equipo debe comprenderse a fondo, siendo ésta la parte central de la tesis, por lo cual es fundamental reconocer las funciones y atenciones que se le deben dar al detector para lograr que trabaje de forma adecuada.

En [3], se utilizaron datos de los reportes de ocurrencia de tormentas eléctricas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México; estos datos fueron una muy buena aproximación. Después de esta publicación, surgió la necesidad de contar con un sistema de monitoreo y detección de electricidad atmosférica para poder estudiar el efecto meteorológico en los rayos cósmicos.

El detector de campos eléctricos atmosféricos Boltek EFM-100 fue instalado en la azotea del edificio anexo a Geofísica (Figura 7), [26]. Con la finalidad de evitar la detección de variaciones espurias, se montó en medio de la tierra física del edificio. De igual manera, el montaje se efectuó a aproximadamente 6 m de distancia de los sistemas de ventilación del edificio, ya que los campos eléctricos de los motores pueden inducir ruido a las detecciones del equipo instalado.

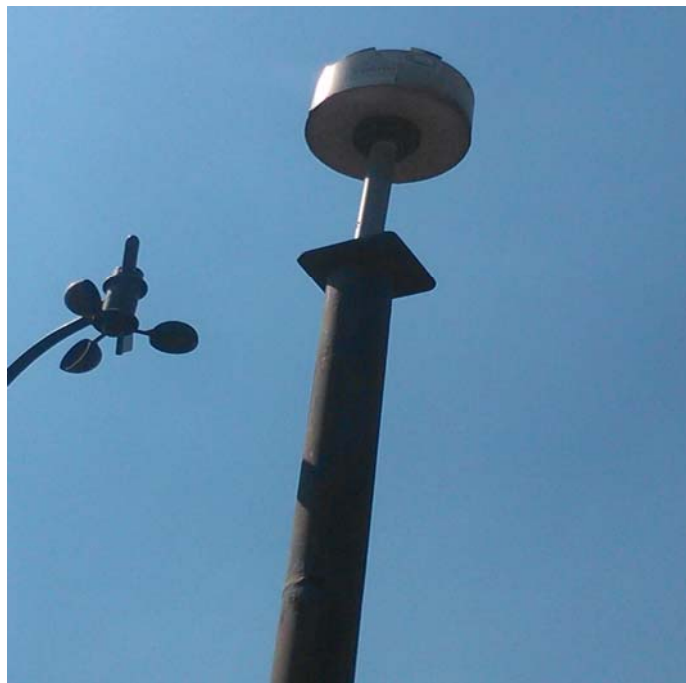


Figura 7. Molino de campos eléctricos Boltek EFM-100, ubicado en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

El software de registro que emplea el detector Boltek EFM-100 (Figura 8) puede ser manipulado mediante scripts de programación que nos permita un mejor manejo. En la sección 2.3, se habla más a fondo sobre las especificaciones de los requerimientos y limitaciones del software utilizado.

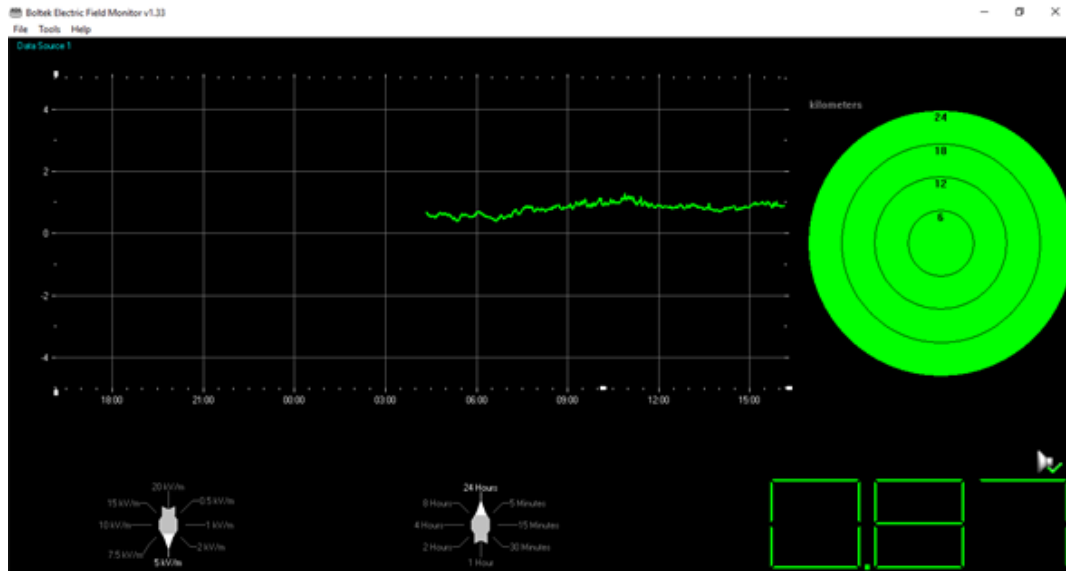


Figura 8. Software de operación del Boltek modelo EFM-100

Actualmente, el Boltek EFM-100 está en operación continua, se encuentra registrando la intensidad de \vec{E} y determina la frecuencia de descargas eléctricas dentro de su radio de detección. Desde su puesta en marcha, no ha presentado fallas de consideración y su funcionamiento se encuentra bajo supervisión constante, así como la estabilidad de los datos registrados.

Mantener un equipo de medición de \vec{E} de alta rango en correcto funcionamiento permite mejores interpretaciones de los datos. Entre otras cosas, una toma de datos óptima permite evaluar con mucho mayor precisión los resultados de simulaciones numéricas, de ahí la importancia de la correcta calibración del equipo, ya que la reducción en la incertidumbre en la instrumentación empleada es un factor sumamente útil para garantizar que los modelos numéricos se acercan lo mayor posible a la realidad.

2.2. DISEÑO DEL MONITOR DE CAMPOS ELÉCTRICOS BOLTEK EFM-100

El Boltek EFM-100 (Figura 9), cuyo modo de detección está bajo el esquema de molino de campos eléctricos (\vec{E}), posee la facultad de detectar las descargas eléctricas en un radio de hasta 24 km y mide la intensidad del \vec{E} atmosférico. La información obtenida es guiada a través de un cable de fibra óptica, el cual llega a un convertidor de intensidad de luz a niveles analógicos (voltaje) y digital (binario), en este caso se emplea el sistema digital, la información es enviada a una PC que funciona como sistema de visualización y registro, esto se hace empleando la comunicación serial RS-232 y RS-232 a USB.

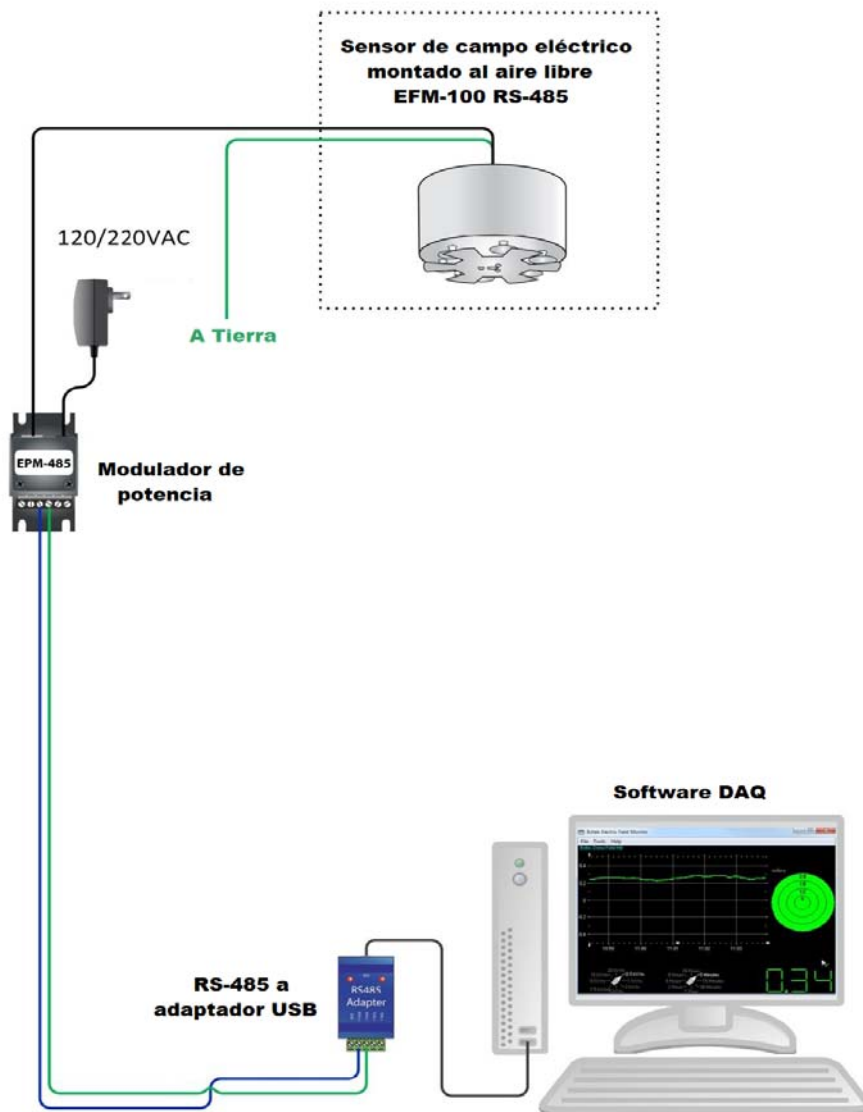


Figura 9. Diagrama de conexión estándar del EFM-100.

El detector consiste en un dispositivo electromecánico llamado “molino de campos eléctricos”, el cual mide la intensidad de los campos electrostáticos y es capaz de lograr la detección de \vec{E} atmosféricos. El molino de \vec{E} Boltek EFM-100 es del tipo obturador rotante, el cual consta de unas placas estacionaria con un disco de electrodos en rotación (Figura 10). Los molinos de campo de tipo obturador distorsionan el \vec{E} y no son capaces de medir el gradiente de campo. Por lo tanto, deben ser calibrados en la misma situación (geometría, materiales circundantes, distribución de carga, etc.) que se encontrarán durante las mediciones. Así, el procedimiento de calibración puede ser complejo y variar con el tiempo en las situaciones dinámicas frecuentemente encontradas en procesos industriales, [27, 28].

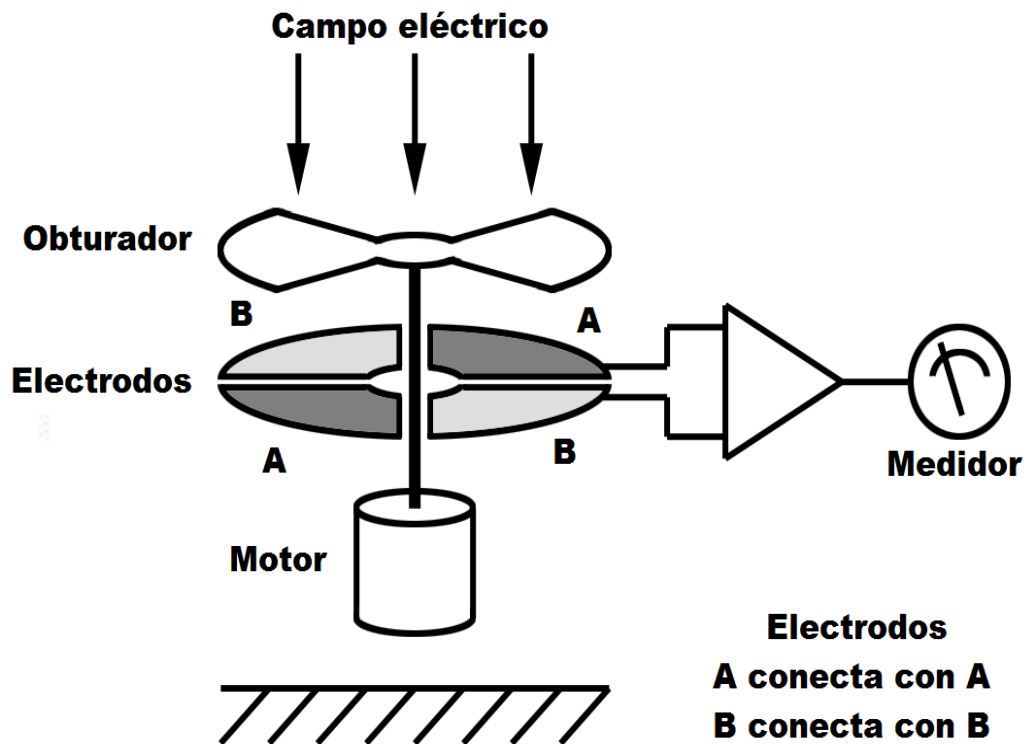


Figura 10. Esquema del molino de campos eléctricos, [29].

2.3. SOFTWARE Y ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

La forma de operar del equipo debe comprenderse a fondo, siendo ésta la parte central de la tesis, por lo cual es fundamental reconocer las funciones y atenciones que se le deben dar al detector para lograr que trabaje de forma adecuada.

El software requerido para la operación del Boltek EFM-100 es admitido por los sistemas operativos pertenecientes a la plataforma de Microsoft; el equipo de registro utiliza la plataforma de Win-10 con la versión V1.33 del software. Actualmente se hace muy complicado el utilizar software libre en el manejo de los programas de adquisición de datos, ya que muchos drivers y bibliotecas no tienen compatibilidad con los kernels de Linux.

Un sólo sistema de visualización y registro puede recibir lecturas de hasta 4 fuentes de datos, es decir; molinos de campos eléctricos. En el Instituto de Geofísica de la UNAM sólo se cuenta con uno. Cada una de las fuentes de datos están conectadas a un puerto COM, en este caso, la fuente está conectada al puerto COM usando un adaptador RS232, por lo que el puerto COM correspondiente será COM1 o COM2.

Como una característica especial, el software del EFM-100 es capaz de emitir cuatro tipos de alarmas:

- *Alarma de campo eléctrico alto*: se activa cuando las lecturas exceden un valor fijado por el usuario y se mantienen un cierto intervalo de tiempo por encima del mismo. El intervalo de tiempo y la duración de la emisión de la alarma también es seleccionado por el usuario.
- *Alarma de campo eléctrico muy alto*: funciona de la misma manera que la alarma de campo eléctrico alto, pero con valores especificados como extremos.
- *Alarma de rayos*: se activa cuando el equipo detecta eventos de descargas eléctricas dentro de su radio de medición. Se mantiene activada hasta que los eventos de descargas cesan.
- *Alarma Delta*: funciona de manera similar a las dos primeras. Por ejemplo, si se desea que se active cuando las lecturas sobrepasen el valor de 1 kV/m o -1kV/m y con un intervalo de 60 segundos, el campo eléctrico necesita incrementarse por encima de 1 kV/m o más durante 60 segundos para activar la alarma Delta.

El Boltek EFM-100 tiene un rango de medición de \vec{E} que va de -20 kV/m a 20 kV/m.

Normalmente, el intervalo de interés es de -5 a 5 kV/m. El rango de temperaturas dentro del cual el equipo puede funcionar es de -40 a 60°C, [30].

Todos los datos registrados son almacenados en un archivo único que se crea automáticamente de manera continua; en otras palabras, un nuevo archivo es creado dentro del primer minuto de un día y se guardan todas las lecturas registradas hasta el último minuto de ese mismo día en un único archivo. Los datos se almacenan en archivos de extensión “.efm” y pueden ser administrados como archivos ASCII y visualizados en modo gráfico. En la pantalla del equipo de visualización, el software despliega una ventana donde todas las lecturas del día son visibles (Figura 11), está disponible una opción para seleccionar los valores máximos en las gráficas. El selector del rango de tiempo permite cambiar la escala horizontal de los ejes, las opciones disponibles son 5, 15 y 30 minutos, y 1, 2, 4, 8 y 24 horas. El selector de rango de amplitud tiene las escalas de 0.5, 1, 2, 5, 7.5, 10, 15 y 20 kV/m para permitir un mejor análisis de los datos en tiempo real.

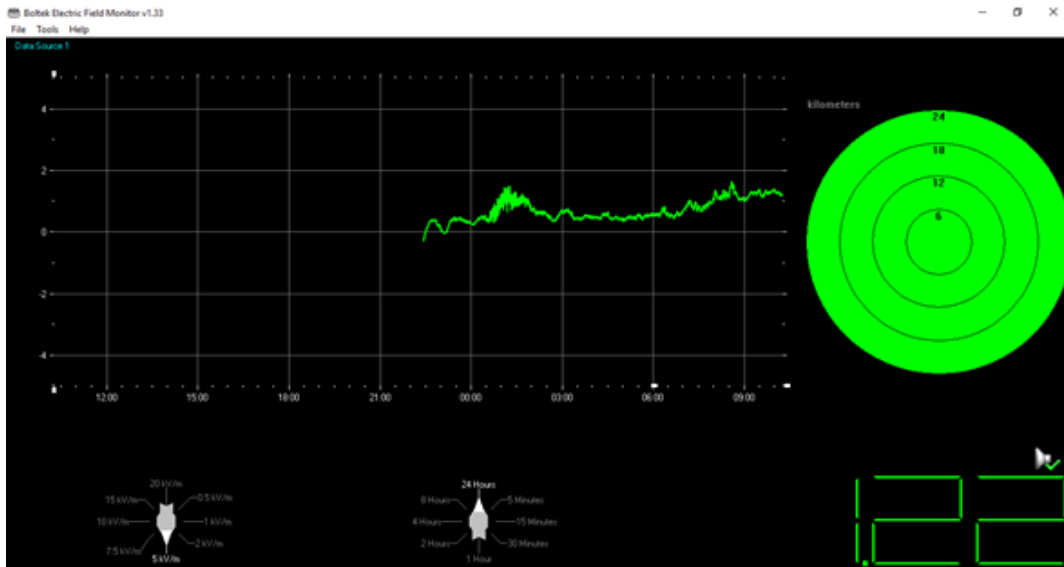


Figura 11. Pantalla de operación del software el Boltek EFM-100 versión V1.33. Los ejes pueden ser ajustados de tal forma que permiten un análisis más profundo de los datos registrados.

2.4. FUNCIONAMIENTO DEL EFM-100

El detector funciona por inducción electrostática. Consiste en un arreglo de veletas que se encuentran en movimiento de rotación alrededor del eje del molino, éstas se encargan de la exposición y posterior protección periódica de un par de electrodos de detección. Para obtener las lecturas óptimas, el obturador rotante debe apuntar hacia la fuente del campo eléctrico que se desea medir, en este caso, apunta en dirección perpendicular al suelo.

En el momento de la exposición, una carga es arrastrada desde el suelo hacia las placas de detección a través de un resistor. Posteriormente el molino vuelve a proteger las placas y la carga fluye por el resistor de vuelta al suelo. El resultado de esta carga en movimiento es una corriente eléctrica alterna (CA), la cual fluye a través del resistor y puede ser fácilmente amplificada y se mide como una diferencia de potencial en el resistor, la magnitud de tal diferencia de potencial es proporcional a la magnitud del campo eléctrico aplicado sobre las placas. Utilizando la ecuación:

$$E = V/d \quad (1)$$

En donde E representa la magnitud del campo eléctrico \vec{E} , V es la diferencia de potencial que se mide, y d es la distancia entre las placas, es que se puede medir el \vec{E} en el detector. Así mismo, la magnitud del \vec{E} depende del área de los electrodos que es expuesta al \vec{E} en un cierto instante de tiempo y de la permisividad del medio; en principio, se puede hacer una aproximación tanto para la carga como para la corriente usando la constante de permitividad en el vacío.

Todo monitor de \vec{E} de corriente alterna incluye dos partes esenciales: una antena y un receptor. Los \vec{E} atmosféricos que producen las nubes de tormenta son de frecuencias extremadamente bajas (3 Hz a 3 kHz). La diferencia de potencial recibida en el resistor, o bien, en el sensor, se amplifica y es alimentada en un interruptor analógico junto con una versión fuera de fase de la señal original (Figura 12). La medición de la dirección del campo se logra al medir el cambio de fase de la señal de corriente alterna relativa a la orientación del campo medido. Los cambios en la diferencia de potencial que se miden corresponden a variaciones que toman lugar en la atmósfera debido a la presencia de nubes de tormentas eléctricas, [31, 32].

2.5. TEORÍA DE OPERACIÓN

Durante la aproximación de nubes de tormenta hacia el molino de \vec{E} (Figura 13), un primer indicio común es una lectura creciente de \vec{E} positiva seguida de una inversión a una lectura negativa conforme la nube queda por encima del molino (Figura 14).

Si la nube de tormenta se encuentra directamente encima del detector (Figura 15), ocurre una inversión de la polaridad del \vec{E} , resultando en lecturas con valores negativos (Figura 16).

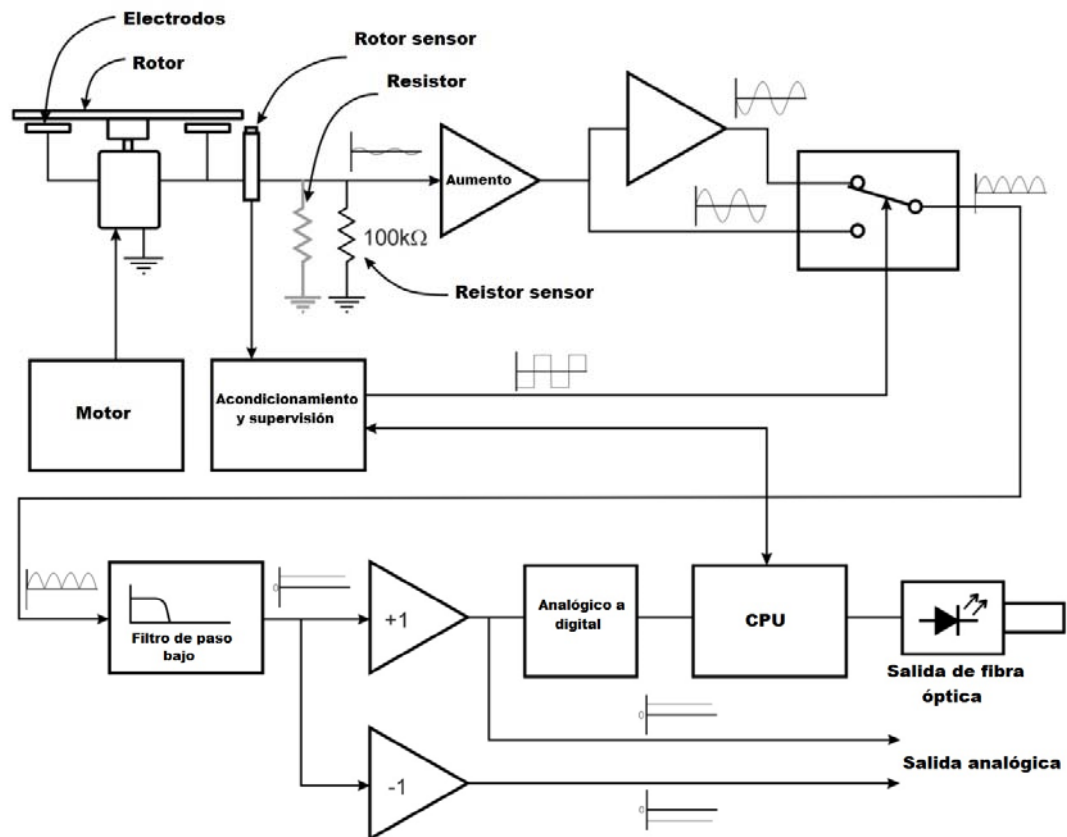


Figura 12. Diagrama de bloques del molino de campos eléctricos, [30].

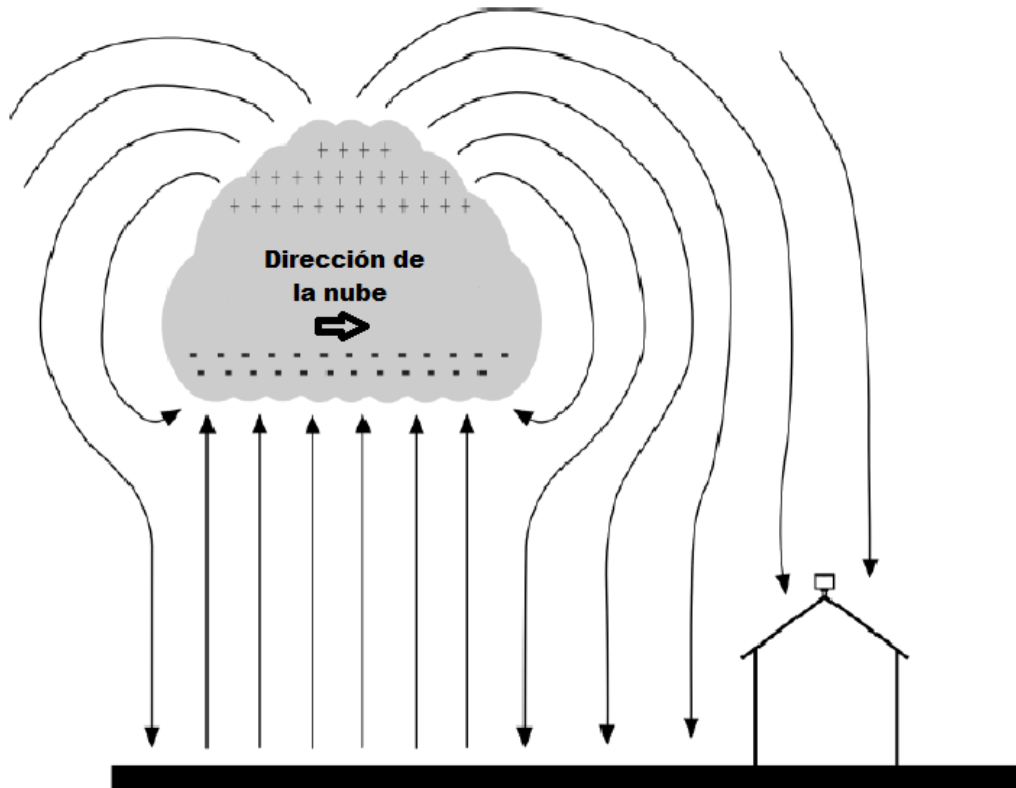


Figura 13. Esquema bidimensional de una nube aproximándose hacia el detector. Las curvas representan la interacción de las líneas de campo eléctrico de la nube y del suelo, [30].

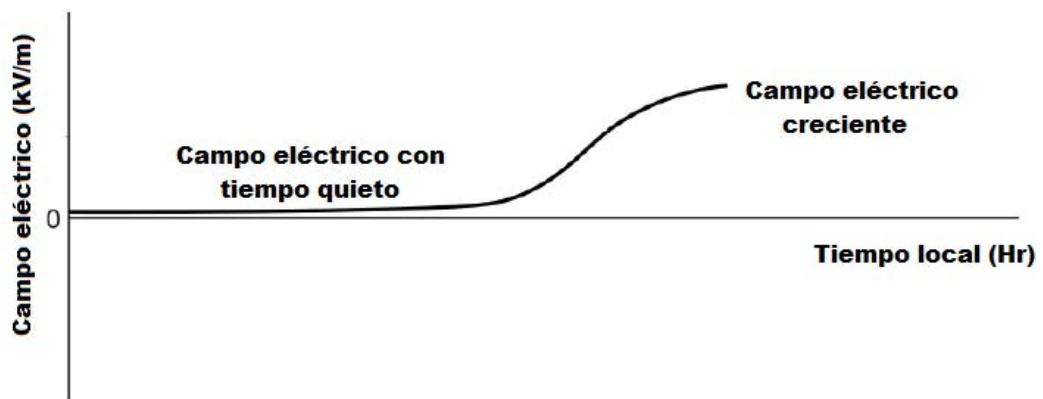


Figura 14. Gráfica ilustrativa del incremento de campo eléctrico debido a una nube de tormenta aproximándose al detector, [30].

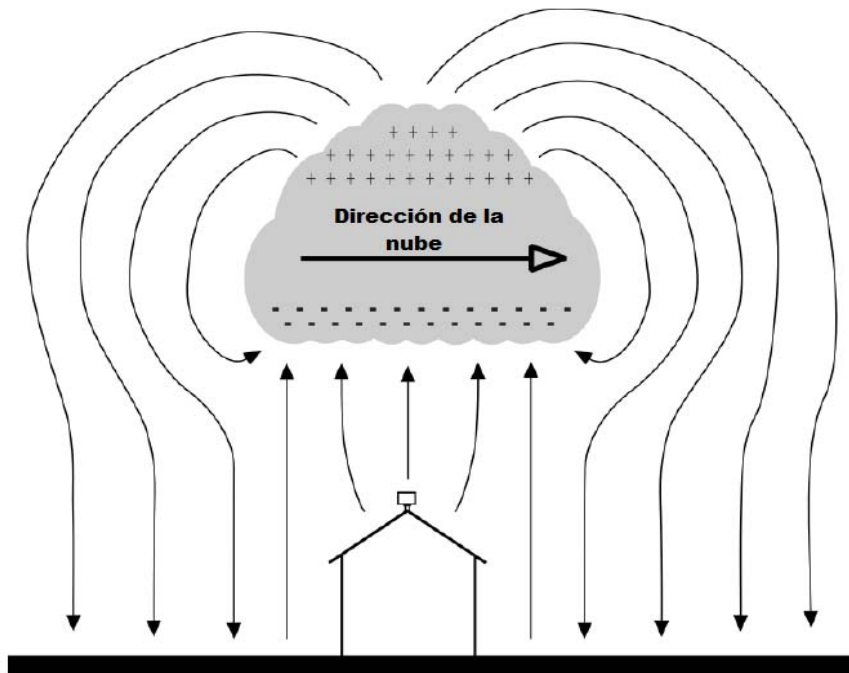


Figura 15. Esquema bidimensional de una nube de tormenta posicionada justo encima del detector. Cuando ocurre esto, se observa una inversión de la polaridad del campo eléctrico, [30].

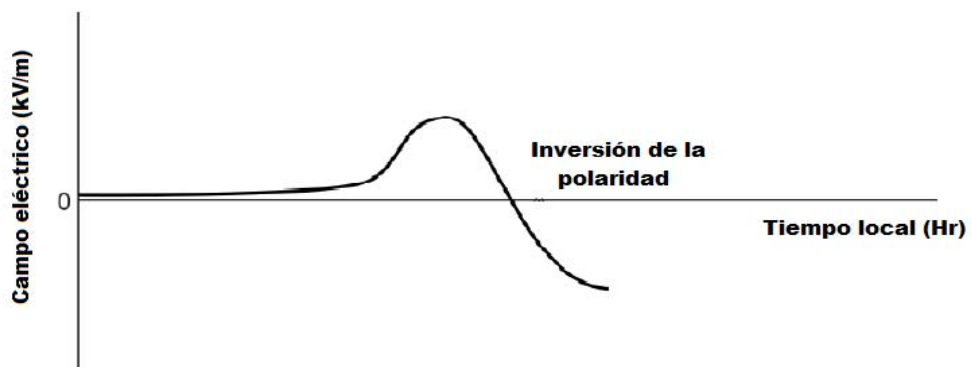


Figura 16. Esquema ilustrativo de la inversión de polaridad del campo eléctrico hacia valores negativos, [30].

Una vez que la nube ha rebasado la posición del molino de \vec{E} , las lecturas comienzan a normalizarse (Figura 17). Debido a que, en general, las nubes tienen una configuración bipolar, se recupera nuevamente una inversión positiva del \vec{E} y una tendencia creciente de los datos, para posteriormente recaer en lecturas típicas de “buen tiempo” (esto es, alrededor de 0.1 kV/m). La inversión del campo al final de la tormenta se le conoce como fin de la oscilación por tormentas o *End of Storm Oscillation* “ESO” (Figura 18).

Las variaciones repentinas en la magnitud de los \vec{E} atmosféricos indican la presencia de rayos (Figura 19), la intensidad de la variación es función de la distancia en la cual se detecta desde el molino de campos, por lo cual, los rayos más cercanos producirán una mayor variación que los que se generen lejos del molino. Una característica interesante de los campos electrostáticos de la atmósfera es que permiten la detección a grandes distancias de tormentas eléctricas. El Boltek EFM-100 tiene la capacidad de detectar los rayos en un radio de hasta 32 km [30].

En diversas situaciones, el detector puede estar sujeto a condiciones que son capaces de introducir ruido en la toma de datos, distintos tipos de cuerpos, como el polvo, nieve y hielo son potenciales generadores de ruido, ya que pueden llevar una carga eléctrica que puede entrar en contacto con los sensores en las placas del molino de campos eléctricos. Tales situaciones causan una toma de lecturas erróneas. Durante periodos de lluvia intensa, el ruido por precipitación puede ser altamente significativo (Figura 20) al reducir la capacidad del software de detectar descargas eléctricas y rayos a largas distancias. Afortunadamente, los eventos de electricidad atmosférica que ocurran cerca del detector permanecen aún dentro del rango de detección. Tan pronto cesa la precipitación, el ruido desaparece.

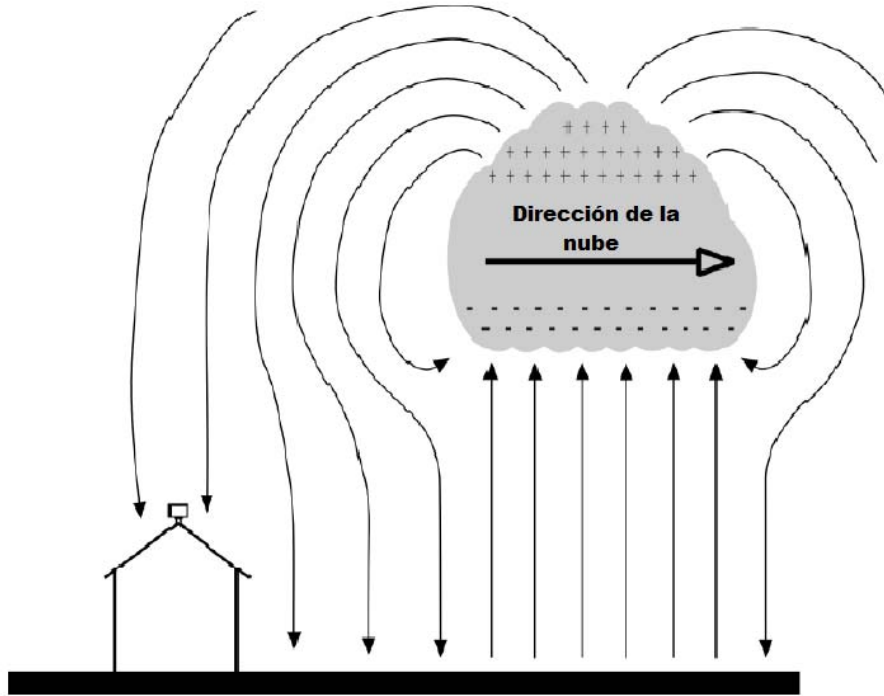


Figura 17. Esquema bidimensional de una nube de tormenta alejándose del detector. Ocurre una nueva inversión de polaridad, [30].

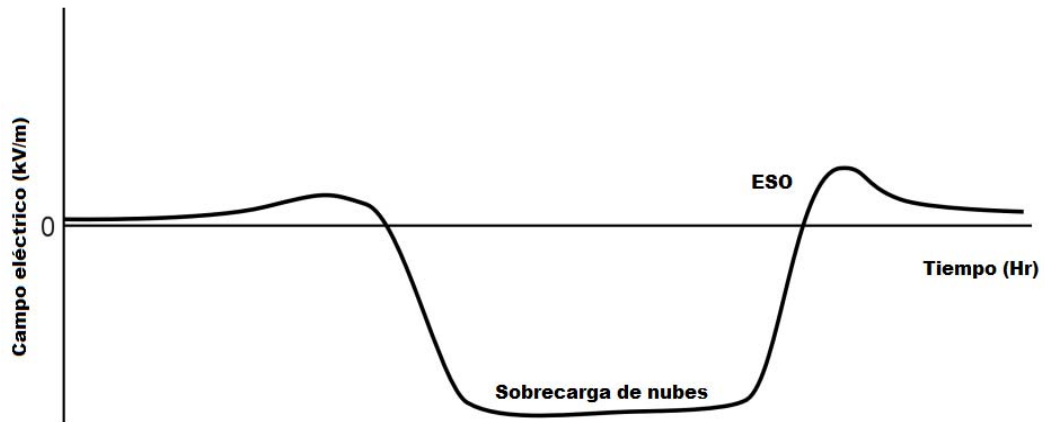


Figura 18. Gráfica ilustrativa del evento conocido como fin de la oscilación de por tormenta o *End of Storm Oscillation* “ESO”, [30].

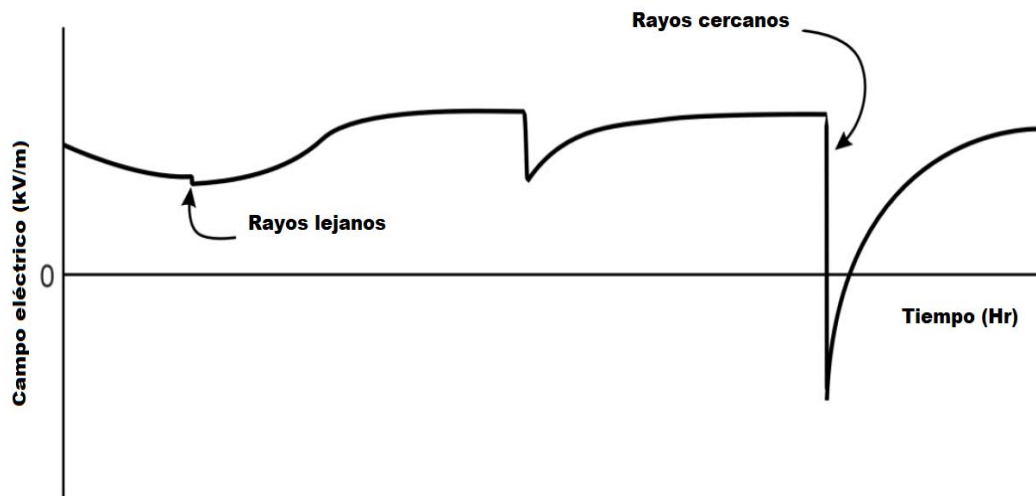


Figura 19. Gráfica ilustrativa de las variaciones que indican descargas eléctricas. La amplitud de la variación es función de la distancia a la cual sucedió el evento, [30].

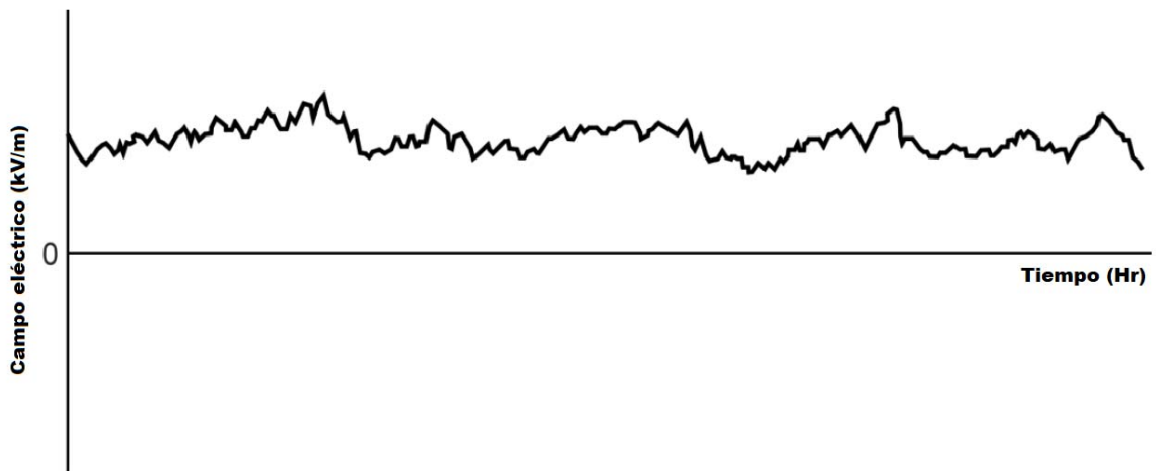


Figura 20. Gráfica ilustrativa de ruido por precipitación; adquiere valores significativos durante tormentas con precipitación intensa, [30].

Capítulo 3:

Calibración del Boltek EFM-100

3.1 MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Como primera acción, se procedió a evaluar la situación física del Boltek EFM-100. Para evitar que pequeños cuerpos de agua u otros portadores de carga tuvieran influencia sobre los electrodos, el molino se encuentra protegido por una envoltura de un material eléctricamente neutro. La velocidad de rotación y el tamaño del instrumento permiten que el electrodo pase el sector abierto antes de que algún objeto portador de carga pueda producir alguna perturbación importante.

Así mismo, se realizó una aproximación para encontrar el factor de corrección con la mayor precisión posible. Un método de gran utilidad fue calcular un factor de corrección geométrico (también conocido en la literatura como reducción de sensibilidad) es el uso de un campo eléctrico de referencia creado artificialmente: es necesario tener un registro de la toma de datos del molino en su posición permanente, esta debe ser fija, ya que en dicha ubicación es donde se realizará la toma de datos permanentemente.

La calibración puede hacerse con ayuda de un segundo molino que ya se encuentre calibrado, debido a que el instituto cuenta con una sola unidad, se procedió a cambiar la ubicación del molino durante periodos de campo eléctrico estable. Este ejercicio se realizó varias veces para hallar el valor más adecuado. El valor de corrección se puede calcular fácilmente mediante el cociente de las lecturas de la referencia entre las lecturas en la ubicación fija (Figura 21). Cabe mencionar que los rangos óptimos de trabajo del detector son de -20 kV/m a 20 kV/m.

Se realizaron varias pruebas en busca de lograr la mejor aproximación de este parámetro, mediante la relación:

$$C = \frac{A}{B} \quad (2)$$

Donde C representa el factor de corrección, es decir, la reducción de la sensibilidad, A es el campo eléctrico medido en la posición de referencia y B es el valor que se mide en la posición permanente del molino.

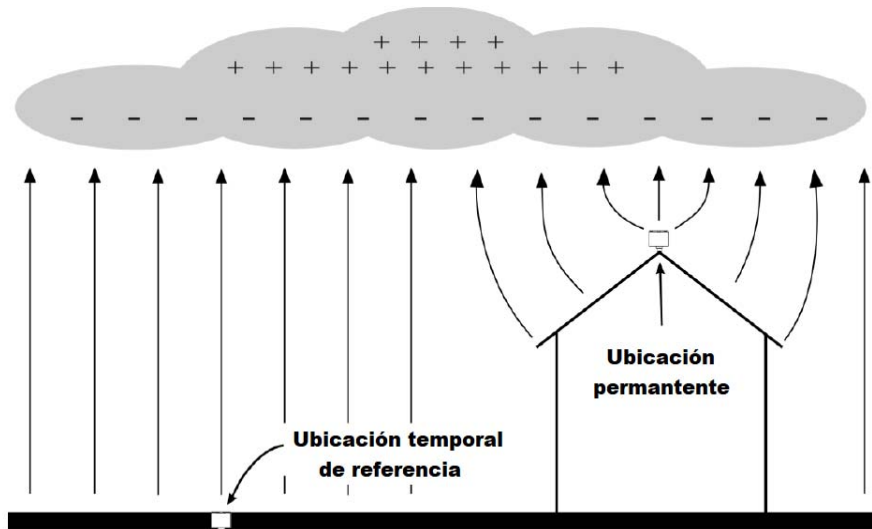


Figura 21. Diagrama ilustrativo sobre cómo determinar el factor de reducción de sensibilidad, [30].

Una vez que se encontró la mayor aproximación, se procedió a calcular el valor del resistor para la conexión de sensibilidad, el cual puede obtenerse de manera muy sencilla mediante la relación:

$$R = \frac{100 \text{ k}\Omega}{(1 - C)} - 100 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

Donde R es el valor del resistor requerido, de acuerdo con el factor de corrección que se encontró en (2).

Se comprobó su linealidad desde el valor mínimo (-20 kV/m) hasta el valor de máxima intensidad (20 kV/m) mediante el uso de una conexión de sensibilidad, la cual genera el campo eléctrico artificial con una intensidad propia de la que presenta un campo eléctrico en tiempo en buen tiempo, aproximadamente 0.1 kV/m, [29].

Se desconocen las causas de la descalibración del equipo con anterioridad; de este modo, los datos recabados en los últimos años no pueden ser tomados en consideración. Utilizando el registro de días en los que el monitor de \bar{E} funcionaba sin calibración, se eligieron al azar diferentes días, asumiendo que las fallas de calibración son representativas de los demás días con lecturas incorrectas, específicamente se seleccionó el 27-03-2012 (Figura 22), el 07-04-2013 (Figura 23) y el 27-03-2013 (Figura 24).

Las figuras 22 y 23 muestran registros fuera de rango en las mediciones de la intensidad del campo eléctrico atmosférico, por lo que los datos no pueden reflejar el verdadero comportamiento del \vec{E} .

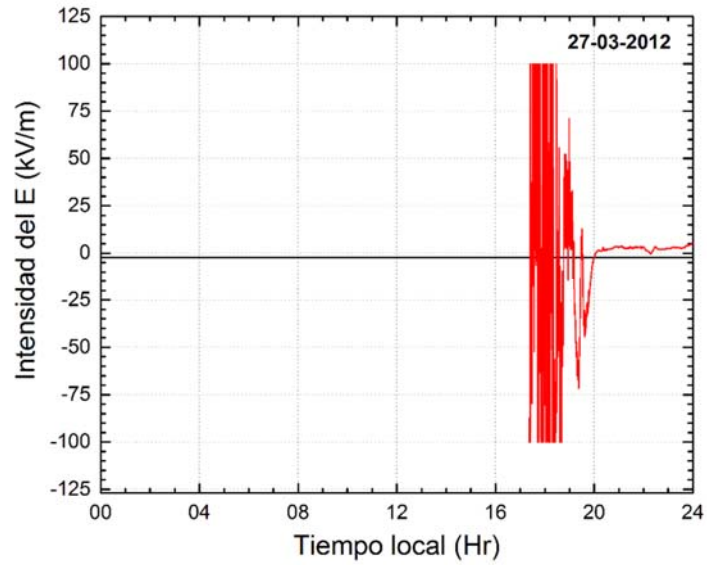


Figura 22. Falla en las lecturas de un día del año 2012 elegido al azar, considerado como representativo de las demás fallas.

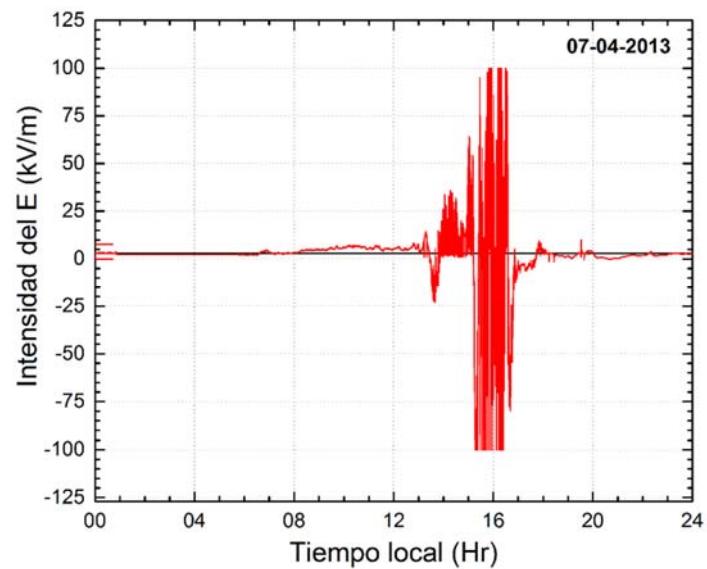


Figura 23. Falla en las lecturas de un día del año 2013 elegido al azar, considerado como representativo de las demás fallas.

La figura 24 muestra variaciones espurias en las mediciones de la intensidad del campo eléctrico atmosférico, además de registro de datos fuera de rango.

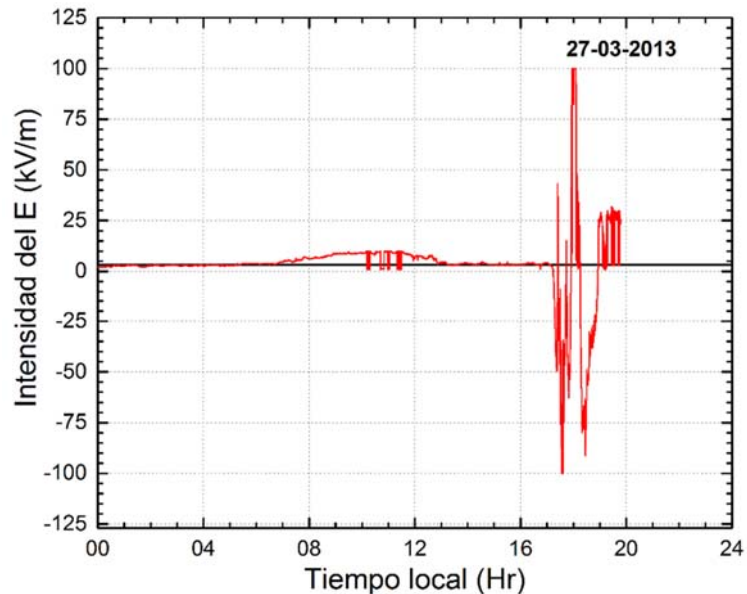


Figura 24. Falla en las lecturas de un día del año 2013 elegido al azar, considerado como representativo de las demás fallas.

Previo al cese definitivo de operaciones del Boltek EFM-100, los datos más recientes, correspondientes al año 2015 (Figura 25), fueron motivo para buscar un trabajo de re-inicialización total del detector. La figura 25 muestra datos espurios y fuera de rango de medición de la intensidad del campo eléctrico atmosférico. Durante este periodo de tiempo, las deficiencias en la calibración fueron todas del mismo tipo, por lo que puede considerarse a cualquiera de los días de registro como una buena representación de las deficiencias que el detector presentó durante cada año.

En el siguiente capítulo se utilizarán datos de diferentes fechas para mostrar una comparación entre el registro calibrado y el no calibrado.

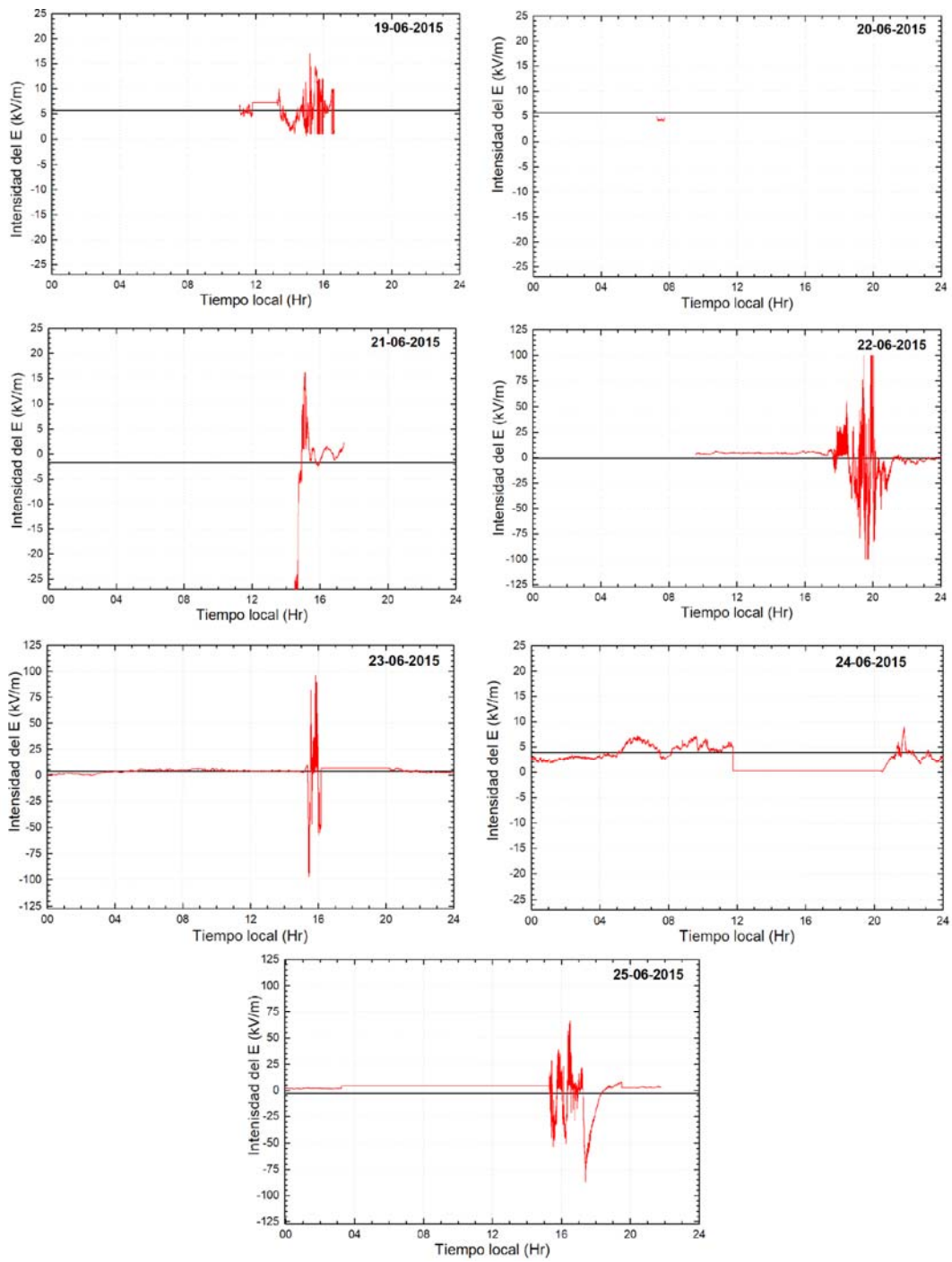


Figura 25. Variaciones del campo eléctrico atmosférico para la semana del 19 al 25 de junio de 2015.

Capítulo 4:

Análisis de los primeros datos

El equipo se mantuvo activo durante los años 2011 a 2015 sin tener una calibración eficiente, por lo que al analizar los registros anteriores del monitor de \vec{E} , se observó que el equipo comenzó a mostrar deficiencias en la toma de datos (figura 26). Algunas de estas fallas fueron:

- Lecturas fuera del rango de medición. El registro de datos con valores fuera de la resolución del dispositivo (de -20 a 20 kV/m).
- Toma de datos incompleta. El detector está sometido a campos eléctricos en todo momento, por lo cual, debe de haber lecturas de campo eléctrico para cada instante de tiempo.
- Anomalías en la toma de datos.

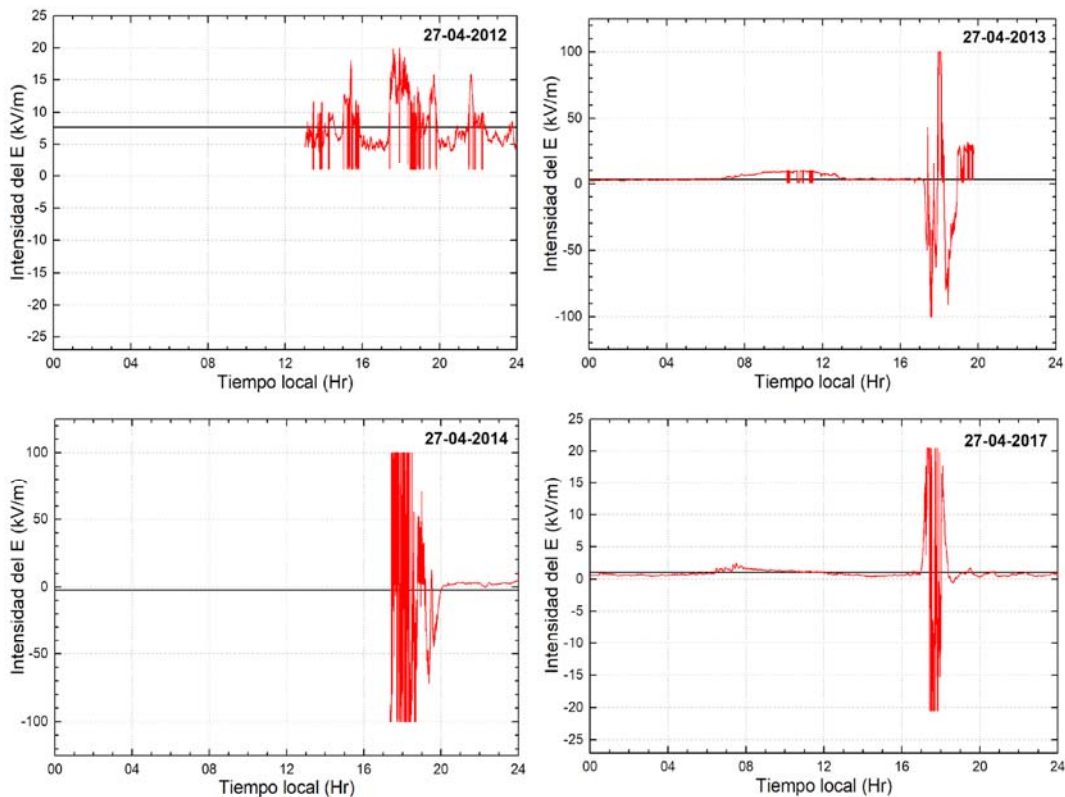


Figura 26. Deficiencias en la toma de datos para días calmados. Algunas deficiencias fueron la toma de datos incompleta (2012), lecturas fuera del rango de medición (2013) y anomalías en la toma de datos (2014). La calibración corrigió todas estas deficiencias (2017).

Cada gráfica de la figura 26 es representativa de un día calmado (27 de abril) de años diferentes, cubriendo el 2012, 2013 y 2014. En estos años la toma de datos del Boltek EFM-100 no fue correcta, evidenciando la necesidad de efectuar una calibración. Este hecho es más notorio en la gráfica correspondiente a los años 2012 y 2013, durante estas fechas, el intervalo de medición del monitor era de -125 a 125 kV/m, un intervalo mucho mayor al que realmente posee el Boltek EFM-100. Después del proceso de calibración, en la figura 26, la gráfica correspondiente al 27 de abril de 2017 muestra una correcta toma de datos para un día quieto.

Una comparación similar se realizó para la semana del 11 al 17 de junio (figuras 27, 28 y 29) de cada año (2013, 2014 y 2017) para el cual se tiene un registro continuo de campo eléctrico atmosférico. Como criterio de selección, se tomó en consideración un periodo de tiempo para el cual haya dado comienzo la temporada de lluvias, permitiendo, de esta forma, el registro del campo eléctrico para días con calma y con tormentas eléctricas.

En el caso de los días con tormentas eléctricas, se espera tener variaciones mucho más abruptas, entonces, el análisis de las lecturas, representado en las gráficas, exhibe la calidad de la calibración. Tal es el caso de la tormenta cuyo inicio fue registrado en la noche del 25 de junio de 2017, concluyendo a tempranas horas del siguiente día (figura 30). Durante este periodo de tiempo, tenemos una tasa de cambio sumamente alta, en la cual los valores medidos por el Boltek EFM-100 exceden su máxima resolución, no obstante, el registro es prácticamente un continuo.

La figura 31 muestra casos similares de mediciones del campo eléctrico durante una tormenta eléctrica. Intensas tormentas eléctricas registradas en la Ciudad de México los días 28 y 29 de junio de 2017, mismas que causaron fuertes afectaciones en las zonas de Polanco e indios verdes. Estas zonas se ubican a 15.8 km y 23.6 km de distancia del detector, respectivamente, y se encuentran dentro del rango de detección del Boltek EFM-100, mostrando así el óptimo funcionamiento que se logró alcanzar con la reinicialización y calibración. La intensidad del \vec{E} se mide 122 veces por minuto y los registros resultan satisfactorios y se mantienen de forma estable desde el 28 de febrero de 2017. Cabe mencionar que a pesar de no haber estado debidamente calibrado, el detector de campos eclécticos tuvo registros adecuados para algunos días (Figuras 28 y 29). Estos valores nos permitieron realizar una comparación con los registros después de la calibración, donde la toma de datos se mantuvo estable y en correcto funcionamiento (Figuras 27 y 32). De este modo, se compararon los días quietos antes de la reinicialización del equipo (17-06-2013 y 17-06-2014) con los días quietos después de la

calibración (03-07-2017 y 15-06-2017). Se encontró que las variaciones no fueron significativas; por ejemplo, los días 17-06-2013 y 15-06-2017 mostraron variaciones máximas y mínimas de la intensidad del E muy similares (11 kV/m y 12 kV/m, respectivamente) y (-15 kV/m y -17 kV/m, respectivamente). Para los días 17-06-2014 y 03-07-2017 las variaciones máximas fueron de 9 kV/m y 7kV/m, respectivamente, y las variaciones mínimas fueron -20 kV/m y -17 kV/m, respectivamente.

En uno de los registros más recientes, se muestran los datos de una semana con días quietos y otros con tormentas eléctricas (figura 32), los cuales reflejan el éxito en la calibración. En esta figura se muestran registros para días quietos (3, 4 y 7 de julio) y para días con tormentas (1, 2, 5 y 6 de julio).

Se puede observar que en los días con tormenta eléctrica los valores de \bar{E} oscilan temporalmente a una frecuencia mayor que durante los días quietos; como se mencionó en el capítulo 2, la amplitud del \bar{E} es función de la distancia a la cual ocurrió un cierto evento de electricidad atmosférica, y también se ve afectada por ruido debido a precipitación y otros factores, en consecuencia, se obtienen lecturas con variaciones muy pronunciadas y con valores incluso mayores a los extremos. Por otra parte, los días quietos se caracterizan por mantener registros cercanos a un valor constante. En general, los días quietos presentan un rasgo característico conocido como la curva de Carnegie, la cual refleja un incremento del \bar{E} que alcanza un valor pico diariamente a las 19 hrs TU, el valor máximo que alcanza es variable y puede ser mayor a lo que el Boltek EFM-100 es capaz de medir. Este comportamiento posee una correlación muy estrecha con el circuito eléctrico global y sugiere depender del tiempo global y no del tiempo local [32]. No obstante, con frecuencia, cuando ocurre una tormenta eléctrica muy intensa, las variaciones abruptas del \bar{E} impiden apreciar la curva de Carnegie en el monitor, acompañadas de inversiones de polaridad altamente variables en el tiempo. Esto no es de extrañarse ya que en general sólo se registran curvas de Carnegie en días con buen tiempo. En la figura 27 se pueden apreciar diferentes casos de días quietos, en dicha figura se presenta la semana del 11 al 17 de junio de 2017, durante este periodo de tiempo, no hubo alguna tormenta eléctrica significativa dentro del rango de detección, lo cual puede observarse en el comportamiento suave de los datos. Como es de esperarse, hay una curva de Carnegie presente excepto en los días 12 y 17, cuyo comportamiento fue anómalo, descartamos fallas en la calibración debido a que las lecturas de días posteriores como los de la figura 30 son correctas; se sugiere atribuir este registro a posibles anomalías en el gradiente de potencial eléctrico local.

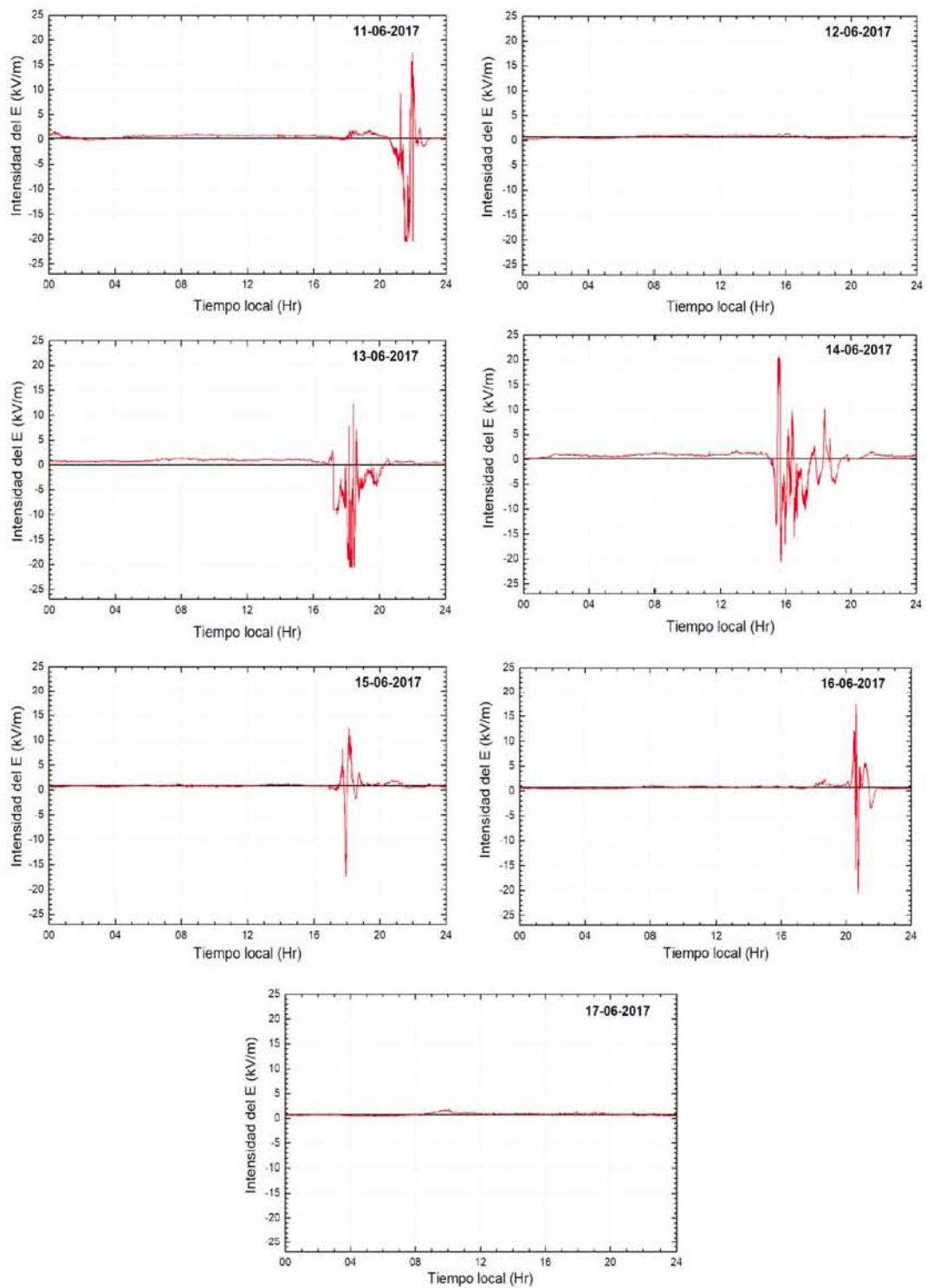


Figura 27. Variaciones del campo eléctrico atmosférico para la semana 11 a 17 de junio de 2017 (calibrada).

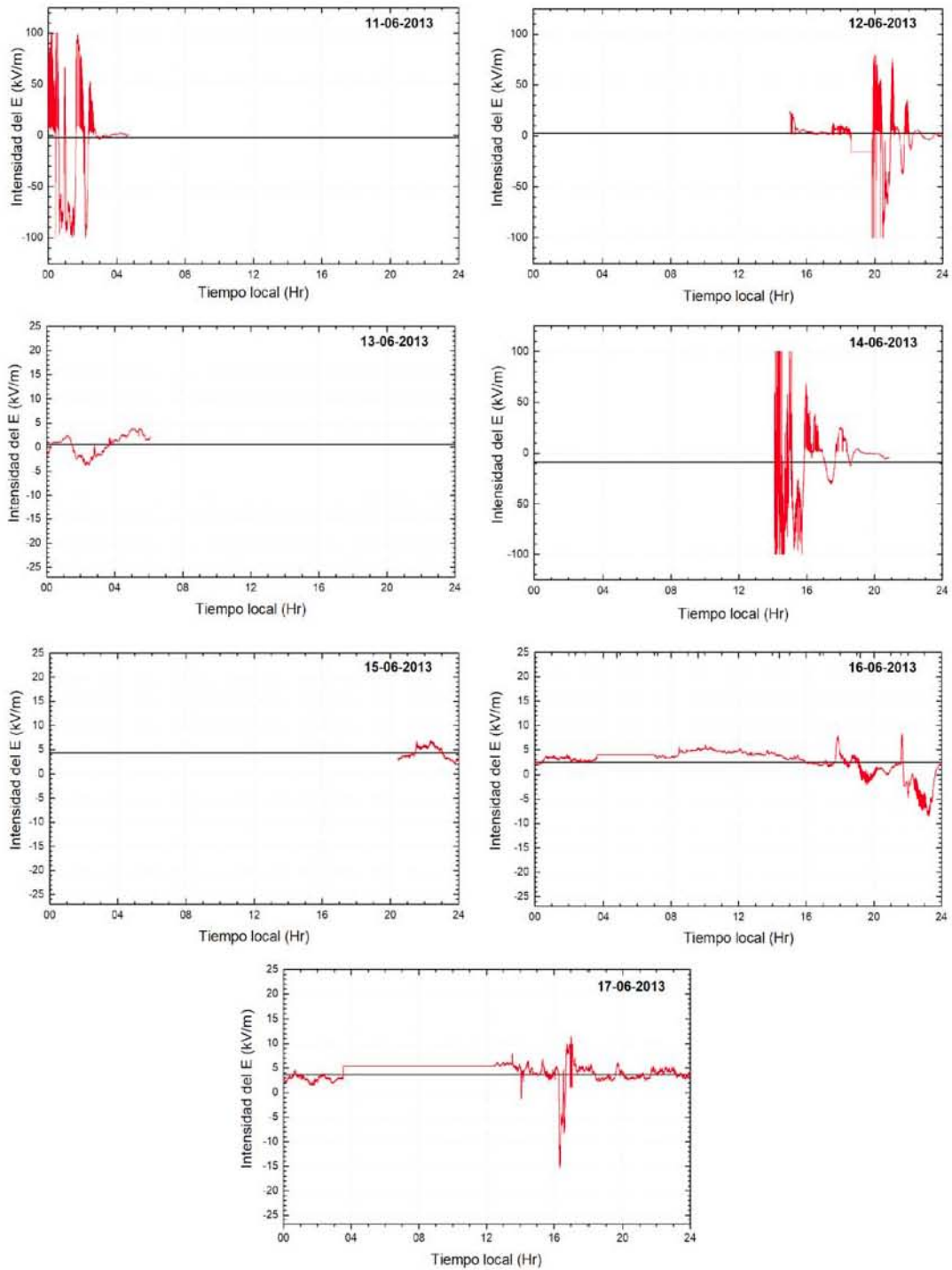


Figura 28. Variaciones del campo eléctrico atmosférico para la semana 11 a 17 de junio de 2013 (sin calibrar).

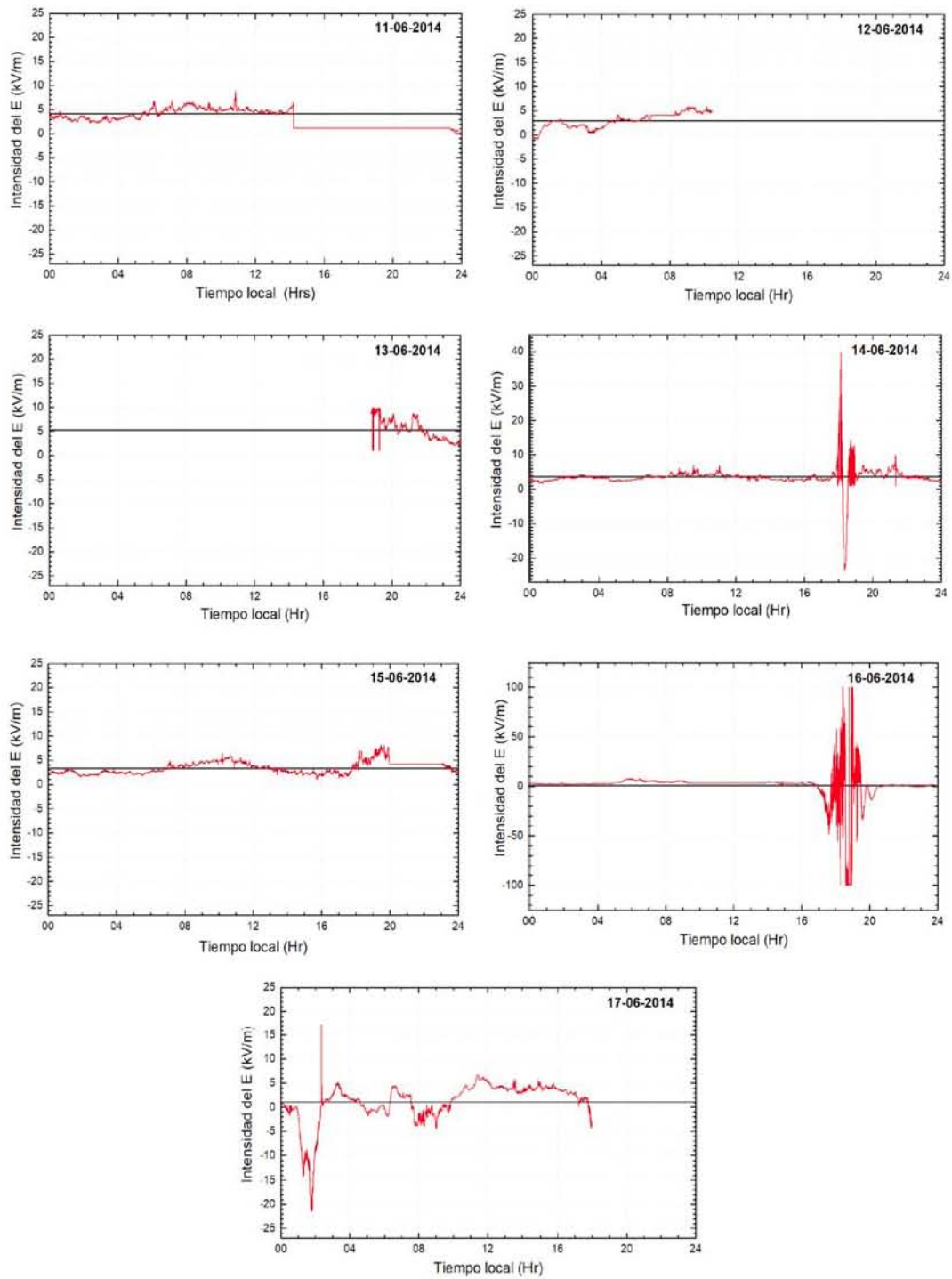


Figura 29. Variaciones del campo eléctrico atmosférico para la semana 11 a 17 de junio de 2014 (sin calibrar).

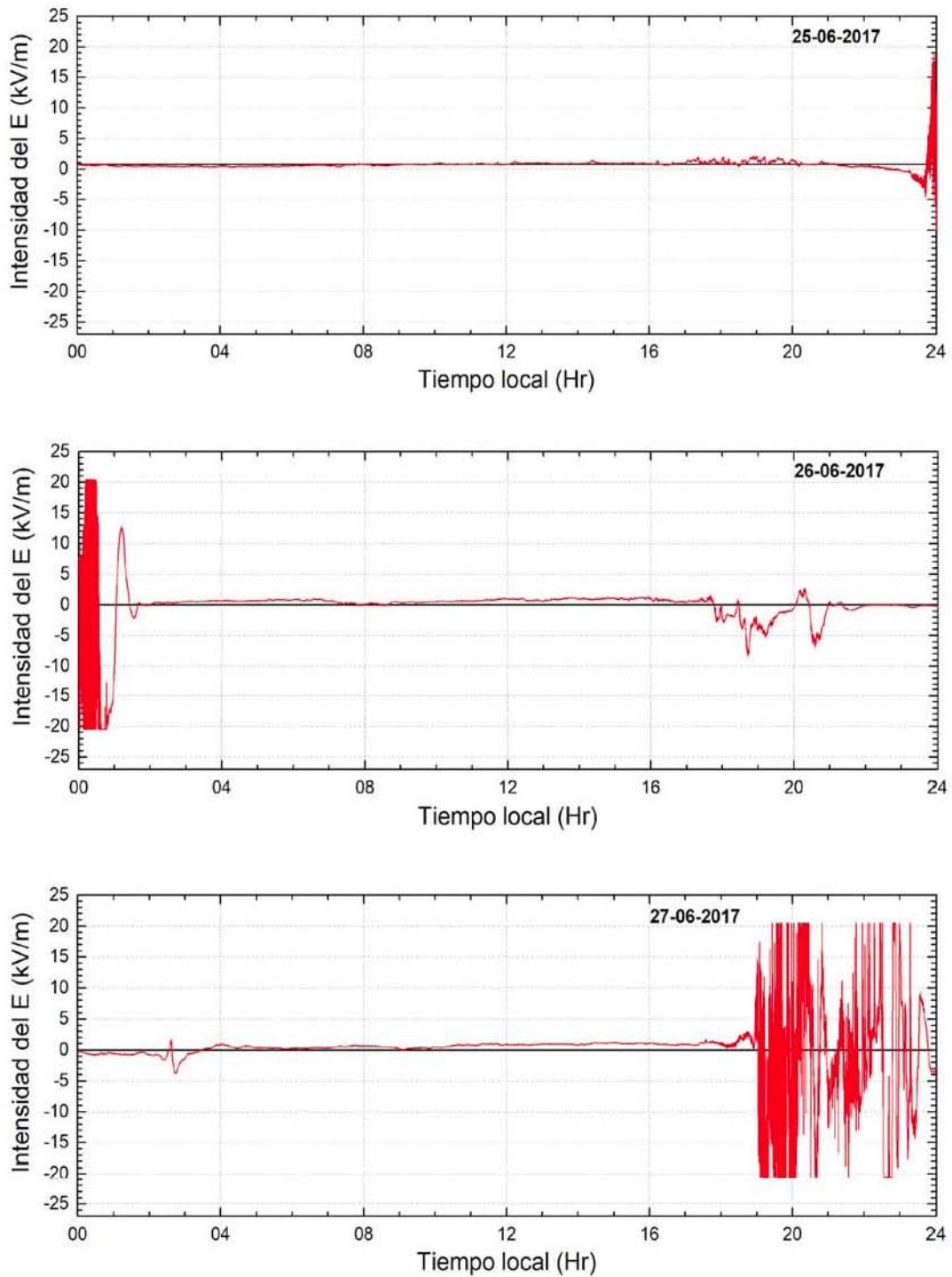


Figura 30. Variaciones el campo eléctrico atmosférico durante una tormenta eléctrica. Los datos muestran las variaciones de \vec{E} para los días 25, 26 y 27 de junio de 2017.

En la figura 31 se presentan dos días en los que se registró localmente una tormenta, en ambos casos, los datos se comportan de manera similar a los de días calmados, exhibiendo un incremento similar a la curva de Carnegie, a diferencia de las tormentas de la figura 30. En ambos casos, los datos se muestran como un continuo y no presentan ninguna de las deficiencias listadas al principio del capítulo, nuevamente se aprecia que la calibración se realizó de manera correcta.

Algunos de los registros más recientes que se tienen hasta el momento están plasmados en la figura 32, donde se muestran los días con tormenta y días calmados de la primera semana de julio del 2017. Los días 1, 2, 5 y 6 corresponden a días con tormentas y los días 3, 4 y 7 a días con buen tiempo. Con base en las gráficas de la figura 32, los datos muestran estabilidad para los días quietos y con tormentas.

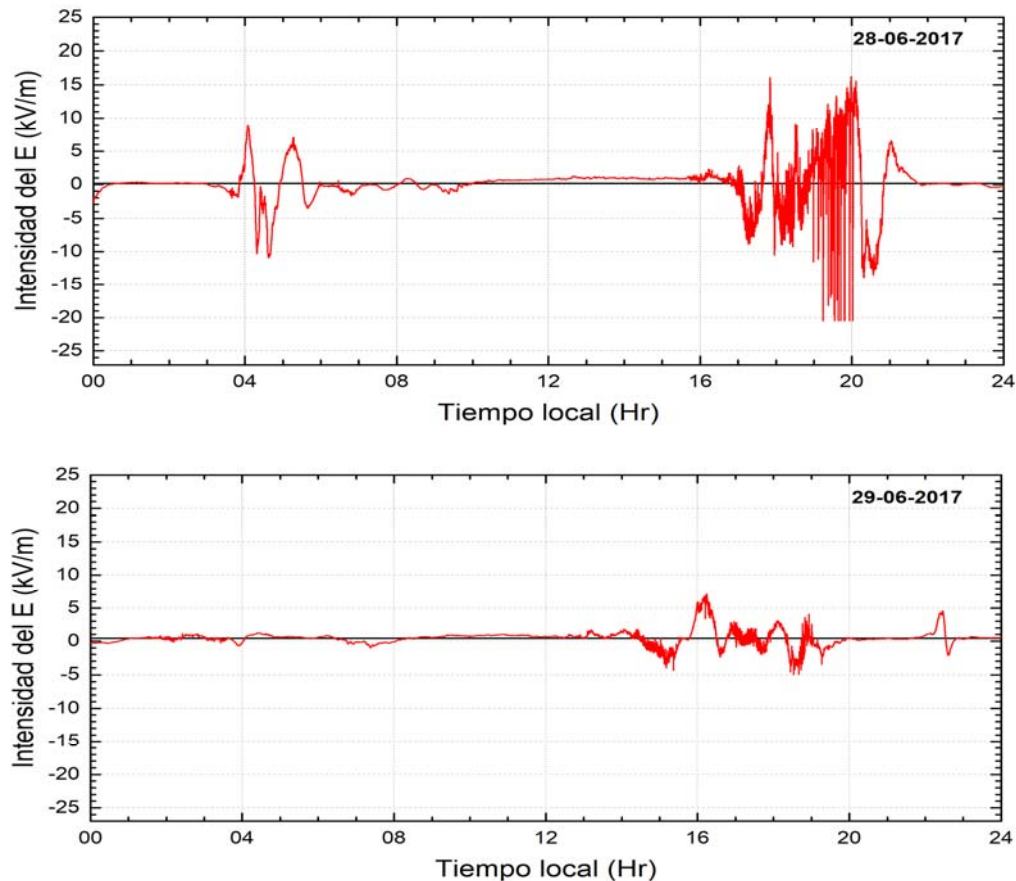


Figura 31. Variaciones del campo eléctrico atmosférico durante las tormentas del 28 de junio (arriba) y el 29 de junio (abajo) de 2017.

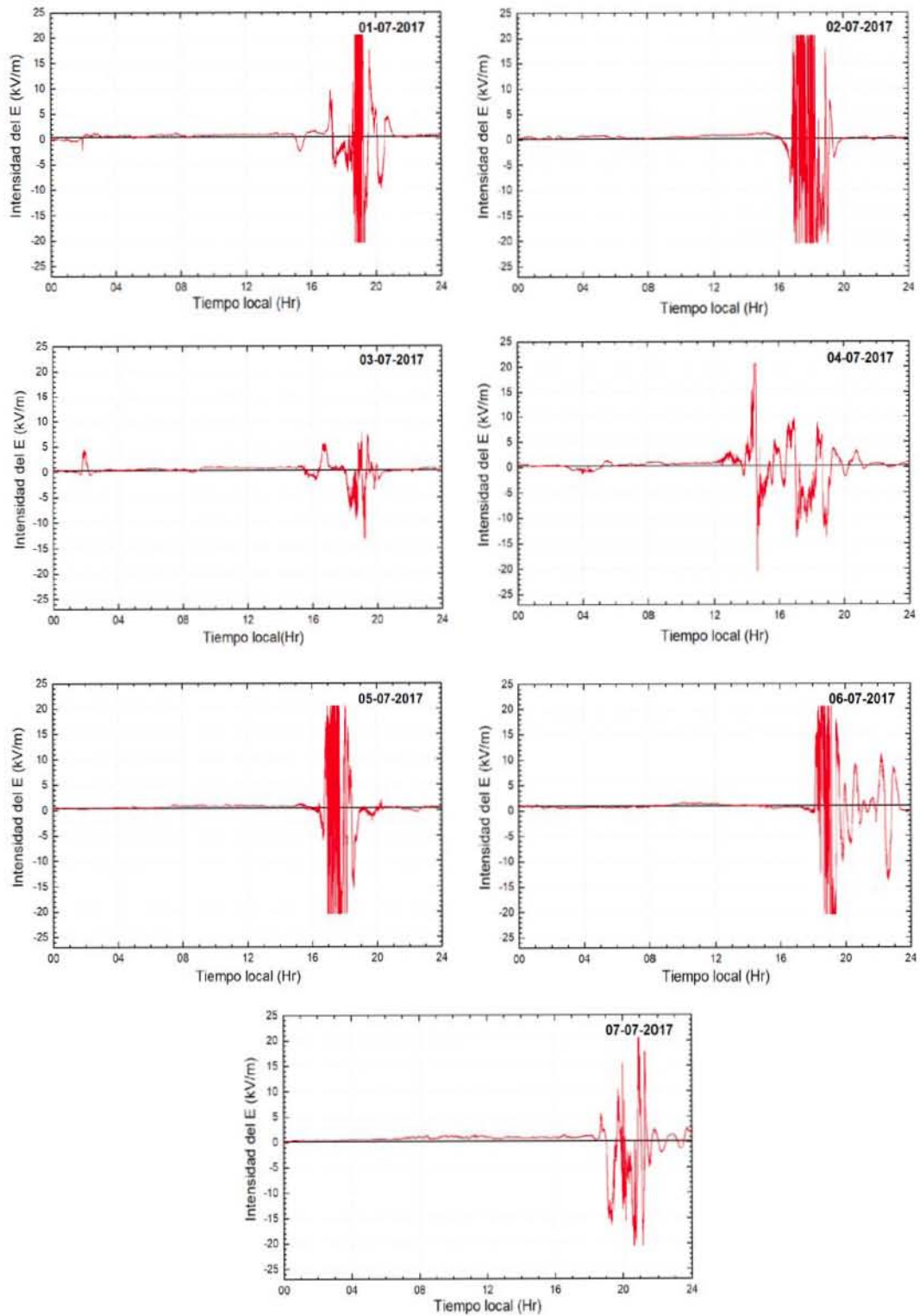


Figura 32. Semana del 01 al 07 de julio del 2017. Se muestran mediciones correctas para días calmados y con tormenta eléctrica.

Conclusiones

Fue posible realizar la reinstalación, calibración y análisis de los primeros datos registrados por el equipo de monitoreo y detección de campos eléctricos Boltek EFM-100. Se pudo determinar que los errores más recurrentes registrados en los datos, antes que el dispositivo se calibrara, fueron lecturas fuera de rango, detección de datos espurios y huecos intermitentes en los datos. Con la reinicialización y calibración, se corrigieron esos errores en el detector y éste opera actualmente de forma correcta y en constante monitoreo.

Con base en las variaciones registradas en la intensidad de los campos eléctricos por el detector Boltek EFM-100 para los días quietos, concluimos que las mediciones actuales y las mediciones buenas realizadas por el monitor antes de suspender su actividad se encuentran en concordancia. De este modo, encontramos que las variaciones para los días 17-06-2013, 17-06-2014 y 15-06-2017 y 03-07-2017 se encuentran en rangos máximos (11 kV/m, 9 kV/m, 12 kV/m y 7 kV/m, respectivamente) y mínimos (-15 kV/m, -20kV/m, -17 kV/m y -12 kV/m, respectivamente) muy similares. Las gráficas muestran una enorme similitud de los datos, ya que las desviaciones no son significativas. Con lo cual, se concluye que el equipo se encuentra calibrado y sus datos son confiables.

Dado que el equipo se encuentra en funcionamiento de manera ininterrumpida desde su puesta en marcha, se considera que actualmente se encuentra en las mejores condiciones para continuar almacenando información relevante sobre las variaciones del campo eléctrico atmosférico, los cuales serán de enorme utilidad para futuros trabajos de investigación, no sólo en el área de las ciencias espaciales, sino también en ciencias atmosféricas y afines; además de permitir el desarrollo de nuevos proyectos, tal es el caso del trabajo de tesis [33].

El presente trabajo hace énfasis en que los datos de intensidad de campos eléctricos atmosféricos son de gran utilidad para determinar la relación de los mismos con las razones de conteo de los rayos cósmicos secundarios detectados en tierra. La calibración del Boltek EFM-100 abrirá las puertas a la realización de estudios más elaborados acerca de estos fenómenos. La teoría de Dorman [8, 10, 34] se fundamenta en campos eléctricos cuyas intensidades fluctúan entre 10 y 20 kV/m, las cuales se encuentran dentro del rango de medición del equipo.

En estudios similares, como el que fue llevado a cabo en [35], la instalación de un equipo de monitoreo de campos eléctricos también representa una gran ventaja para poder correlacionar las caídas en la intensidad de los rayos cósmicos con la actividad y variaciones de la electricidad atmosférica.

Los días con tormentas exhiben un comportamiento mucho más variable y un gradiente de potencial eléctrico mayor a los días quietos, la amplitud de las curvas que representan los datos puede llegar a alcanzar valores que sobrepasan la capacidad de medición del equipo calibrado en este trabajo de tesis. Por otra parte, un comportamiento típico de los días quietos trae consigo un incremento que culmina en un valor pico, conocido como curva de Carnegie, el cual está asociado a fenómenos globales de electricidad atmosférica. Vale la pena recalcar la importancia de contar con instrumentación de este tipo, fundamental para estudios de variaciones de la intensidad de rayos cósmicos secundarios debido a fenómenos atmosféricos. Para este trabajo de tesis, se concluye que el equipo Boltek EFM-100 se encuentra funcionando en las mejores condiciones.

El alcance de este trabajo no se limita a las áreas de investigación del Instituto de Geofísica de la UNAM, entre los aspectos más notables se encuentran:

- La creación de una base de datos continua. Esto permitirá realizar trabajos de análisis y estabilidad, para lo cual es necesario continuar con la gestión y administración del equipo y los datos registrados.
- El desarrollo de un software de adquisición de datos y de graficación automatizado. El software que utiliza este equipo de monitoreo tiene limitaciones, siendo la principal de ellas la compatibilidad con las distintas plataformas de software disponibles en la actualidad. Es sumamente deseable que el software que aquí se propone sea libre para evitar limitaciones por licencias y otros aspectos de cómputo. Además de permitir el libre manejo y distribución del mismo.
- La incorporación del equipo a una red de detectores similares. Ya se ha hecho énfasis en el éxito de la puesta en marcha del Boltek EFM-100, lo que permitirá la integración del monitor a una red multi-institucional, donde se administren los datos de diferentes monitores distribuidos en México.

Apéndice

Condiciones de operación del detector de campos eléctricos.

El Boltek EFM-100 funciona en prácticamente cualquier estado del tiempo y puede ser operado vía remota en situaciones en las que no está disponible una corriente alterna, utilizando una corriente directa con 12 V.

La capacitancia total entre el arreglo del rotor y el obturador es de ~ 500 pf y ~ 90 pf.

La capacitancia dinámica entre el rotor y las placas es de ~ 6 pf.

La capacitancia específica entre las placas es 2.4×10^{-8} fm⁻².

El rotor tiene un diámetro de 12 cm y se encuentra fijo sobre el eje de un motor síncrono (AC) de 1400 rpm y 12 W de potencia. Está hecho de acero inoxidable no magnético. La conexión a Tierra está hecha con una copa de mercurio

Los obturadores están separados por una distancia de 0.5 cm con cojines de teflón, tienen el mismo diámetro que el rotor y están fabricados con mercurio, [29, 36].

Referencias

- [1] Pierre Auger Observatory www.auger.org/index.php.
- [2] <https://helios.gsfc.nasa.gov>.
- [3] Tesis de maestría, Álvarez Castillo Jesús “Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre”.
- [4] Tesis de maestría, González Méndez Luis Xavier “Efectos de los campos eléctricos atmosféricos en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre”.
- [5] http://www.geofisica.unam.mx/observatorios/rayos_cosmicos/grupo_raycos/antecedentes02.html
- [6] Otaola, J. A., J. F. Valdés-Galicia. *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas. La ciencia desde México*. F. C. E., México, 1995.
- [7] Lidvansky, A. S. The effect of the electric field of the atmosphere on cosmic rays, (2003) *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 29 925.
- [8] Wilson, C T R 1925 The electric field of a thundercloud and some of its effects *Proc. Phys. Soc. Lond.* 2 37 32D–37D.
- [9] Dorman, L. I., Geomagnetic and atmospheric effects in primary and secondary cosmic rays, *Cosmogenics nuclei. Proc. “20-th Inter. Cosmic Ray Conf.*, 8.186. 1987.
- [10] Alexeyenko, V. V., A. E. Chudakov, et al.; Short perturbations of cosmic rays intensity and electric field in atmosphere, *Proc. 19-th ICRC. La Jolla.* 5. 332. 1985.
- [11] Dorman, L. I., I. V. Dorman, Cosmic ray atmospheric electric field effects, *Canadian J. of Physics.* 73. 440. 1995.
- [12] González, L. X, Valdés-Galicia, J. F., Atmospheric electric field effects of cosmic rays detected in Mexico City. *Geofisica Internacional*, 45(4), 255-262. 2006.
- [13] Alexeenko, V. V., Chernyaev, A. B., Chudakov, A. E., Khaerdinov, N. S., Ozrokov, S. S., Sborshikov, V. G., 1987. Short perturbations of cosmic ray intensity and electric field in atmosphere. In: *Proceedings of 20th ICRC, vol.4, Moscow*, p.272.
- [14] Alexeenko, V. V., N. S., Khaerdinov, et al.; Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration, *Physics Letters A* 301 (2002) 299-306.
- [15] Byers, H. R. and Braham, R.R., 1948. *The Thundestorm*. Weather Bureau, Washington, D.C., 287 pp.

- [16] P. Nickolaenko, and M. Hayakawa, "Electric fields produced by lightning discharges," *J. Geophys. Res.*, 103, 1998, pp. 17,175-17,189.
- [17] http://web.gccaz.edu/~lnewman/gph111/topic_units/thunder_hurr/07_30.jpg.
- [18] Alvarez-Castillo J. & Valdés-Galicia J. F. *Signatures of thunderstorms in the variations of the secondary cosmic rays registered in Mexico City*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72 (2010), 38–50.
- [19] M. Dejnakarindra, and C. G. Park, "Lightning-Induced Electric Fields in the Ionosphere," *J. Geophys. Res.*, 79, 1974, pp. 1903-1910
- [20] S. S. De, B. Bandyopadhyay, Suman Paul, D. K. Haldar, S. Barui, M. De, and Minu Sanfui, S. K.
- [21] <http://lh4.ggpht.com>.
- [22] Takahashi, T., 1979: Warm cloud electricity in a shallow axisymmetric cloud model, *J. Atmos. Sci.*, 36,2236-58.
- [23] Reynolds, S.E., M., Brook, & M. F. Gourley, 1957: Thunderstorms charge separation, *J. Meteor.*, 14, 426-36
- [24] McGorman, R., W. Rust, *The electrical value of storms*, Oxford University Press, New York 1998.
- [25] <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/nube-tormenta-y-rayo/>
- [26] http://www.geofisica.unam.mx/observatorios/rayos_cosmicos/grupo_raycos/EstacionElectricidadAtmosferica.pdf
- [27] <https://www.google.ch/patents/US8536879>
- [28] John G. Webster, Halit Eren, *Measurement, instrumentation, and sensors handbooks*, Second Edition: Electromagnetic, optical, radiation, chemical and biomedical measurement.
- [29] <http://a-tech.net/>
- [30] EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor Installation/.
- [31] http://www.colutron.com/download_files/chap6.pdf
- [32] http://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_09.html
- [33] Tesis de licenciatura en proceso. Newton Bosch Bertha Jania. "*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*".

- [34] Dorman, L. I., Geomagnetic and atmospheric effects in primary and secondary cosmic rays, *Cosmogenics nuclei. Proc. "20-th Inter. Cosmic Ray Conf.*, 8.186. 1987.
- [35] Muraki, Y., Axford, W. I., Matsubara, Y., Masuda, K., Miyamoto, Y., Menjyou, H., ... & Shibata, S. (2004). Effects of atmospheric electric fields on cosmic rays. *Physical Review D*, 69(12), 123010.
- [36] http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/20556/8/08_chapter%203.pdf