



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**EFFECTOS DE LA ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA  
SOBRE EL OBSERVATORIO HAWC DE RAYOS  
GAMMA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
PABLO VANEGAS ANGUIANO

Director de tesis:  
Dr. Alejandro Lara Sánchez  
Instituto de Geofísica

Ciudad Universitaria, CDMX noviembre 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



---

# Resumen

---

El Observatorio HAWC "High Altitude Water Cherenkov" es un observatorio astrofísico de rayos cósmicos y rayos gamma de muy alta energía. HAWC ha detectado incrementos en el número de cuentas del sistema de adquisición de datos principal, con una duración del orden de minutos. Se encontraron un total de 27 incrementos en los datos de HAWC en el periodo comprendido entre marzo de 2014 a octubre de 2015. Se utilizaron datos de la WWLLN "World Wide Lightning Location Network" que es una red mundial de detección de relámpagos a tierra, de una estación meteorológica instalada en el sitio y de un detector de campo eléctrico, para evaluar posibles influencias atmosféricas en los datos de HAWC. Se descartó que los incrementos fueran causados por relámpagos a tierra y por variaciones en la presión atmosférica. Se encontró que durante todos los incrementos se presentó lluvia, un aumento en la humedad relativa mayor a un 85% lo cual sugiere la presencia de nubes de tormenta y finalmente se encontró una correlación entre los incrementos y variaciones negativas en el campo eléctrico.



---

# Contenido

---

Resumen . . . . .	3
<b>1 Introducción</b>	<b>7</b>
1.1 Objetivo . . . . .	8
1.2 Hipótesis . . . . .	9
1.3 Contenido . . . . .	9
<b>2 Electricidad en la atmósfera</b>	<b>11</b>
2.1 Cargas en la atmósfera . . . . .	12
2.2 Campo eléctrico en la atmósfera . . . . .	12
2.3 Circuito eléctrico global . . . . .	14
<b>3 Electrificación de nubes</b>	<b>17</b>
3.1 Nubes . . . . .	17
3.2 Estructura eléctrica de las nubes de tormenta . . . . .	19
3.3 Mecanismos de carga en las nubes . . . . .	20
3.3.1 Teoría de carga convectiva . . . . .	20
3.3.2 Mecanismos de carga inductiva . . . . .	20
3.3.3 Mecanismos no inductivos . . . . .	23
3.4 Relámpagos . . . . .	24
3.4.1 Generación de relámpagos . . . . .	25
<b>4 El Observatorio HAWC</b>	<b>29</b>
4.1 Los detectores . . . . .	32
4.1.1 Tubo Fotomultiplicador . . . . .	33
4.2 Principio de funcionamiento . . . . .	34

---

4.2.1	Rayos Gamma . . . . .	35
4.2.2	Cascadas Atmosféricas . . . . .	37
4.2.3	Radiación Cherenkov . . . . .	37
4.3	Sistemas de adquisición de datos . . . . .	38
4.3.1	DAQ principal . . . . .	39
4.3.2	DAQ secundario . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Análisis de datos</b>	<b>41</b>
5.1	TDC Scalers . . . . .	41
5.2	World Wide lightning Location Network . . . . .	43
5.3	Detector de campo eléctrico EFM-100 . . . . .	44
5.4	Estación meteorológica . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
6.1	Búsqueda de incrementos. . . . .	49
6.2	Incrementos vs tormentas eléctricas . . . . .	51
6.3	Incrementos vs variables atmosféricas . . . . .	52
6.4	Tabla de datos . . . . .	55
6.5	Incrementos vs campo eléctrico. . . . .	58
6.5.1	Caso 1 (Sin descargas a tierra) . . . . .	58
6.5.2	Caso 2 (Con descargas a tierra) . . . . .	60
6.5.3	Correlacion entre el campo eléctrico y los incrementos . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Discusión y conclusiones</b>	<b>65</b>
7.1	Discusión . . . . .	65
7.2	Conclusiones . . . . .	67
7.3	Trabajo a futuro . . . . .	68
	<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>71</b>

# CAPITULO 1

---

## Introducción

---

En los últimos años, varios detectores terrestres de radiación cósmica alrededor del mundo han registrado aumentos en sus conteos de rayos cósmicos. En 1924 C.T.R Wilson sugirió la posibilidad de que electrones pudieran ser acelerados a energías muy altas dentro de una nube de tormenta (cumulonimbus), debido a los campos eléctricos tan grandes que pueden ser generados en su interior (Wilson, 1924). En 1930 se reportó la existencia de un flujo de electrones antes y después de relámpagos localizados a 30 km de distancia (Schonland, 1930). En 1967 se detectó un aumento del 10% en el flujo de rayos cósmicos con duración de un minuto en el Mount Lemmon a 2800 metros de altura en el Centro de Investigación del Rayo de la Universidad de Arizona (Shaw, 1967).

En 2002 en la planta nuclear de Monju en Japón, se observó una emisión de rayos gamma con una duración menor a un minuto correlacionada con la caída de relámpagos cercanos (Torii et al., 2002). También en Japón otro grupo de investigadores en 2004 detectó un aumento en el flujo de partículas con el Telescopio de Neutrones Solares que se encuentra ubicado en la montaña Norikura a 2700 metros de altura, igualmente correlacionado con tormentas eléctricas (Muraki et al., 2004). En 2005 el Baksan Neutrino Observatory en Rusia, registró aumentos en la intensidad de rayos cósmicos blandos (electrones y rayos gamma) en un rango de energías de 10 a 30 MeV presentando una correlación entre los aumentos en la

intensidad de la componente blanda de los rayos cósmicos y el campo eléctrico local (Khaerdinov et al., 2005).

En 2007 la planta nuclear de Kashiwazaki-Kariwa en Japón registró una emisión de rayos gamma con duración de 60 segundos después de la caída de relámpagos en una fuerte tormenta eléctrica. Tsuchiya et al., (2007) dice que estas emisiones se pueden interpretar como fotones Bremsstrahlung procedentes de electrones relativistas, sugiriendo que los electrones se aceleraron a mas de 10 MeV antes de la descarga del relámpago. El mismo autor reporta una detección simultánea de rayos gamma y electrones en el Observatorio Norikura a 2700 metros de altitud, estas emisiones con duración de 90 segundos se asociaron a la presencia de nubes de tormenta (Tsuchiya et al., 2009). En 2010 el Yangbajing International Cosmic Ray Observatory ubicado en el Tibet registró un aumento en el número de cuentas con una duración de 40 minutos en el Solar Neutron Telescope. Chilingarian et al., (2012) reporta aumentos en el conteo de electrones, rayos gamma y neutrones durante tormentas eléctricas en las montañas de Aragats en Armenia a 3200 metros de altitud en el Aragats Space Environmental Center (ASEC) sugiriendo que campos eléctricos dentro de una nube de tormenta son los que dan lugar a flujos de electrones de alta energía y en consecuencia a rayos gamma y a neutrones.

En México también se ha observado este tipo de fenómeno. En el Observatorio HAWC se han registrado incrementos en el número de cuentas, siendo la primera vez que se registran incrementos en un detector de radiación Cherenkov en agua. La ubicación y altura a la que se encuentra HAWC (4100 metros sobre el nivel del mar) lo vuelven un sitio ideal para el estudio de este tipo de fenómenos, ya que en ocasiones HAWC se encuentra cubierto en su totalidad por nubes, por lo que practicamente se tiene un detector de partículas dentro de las nubes.

## 1.1 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo de tesis consiste en encontrar o sugerir una posible explicación de que es lo que está causando los incrementos en el número de cuentas en el Observatorio HAWC.

## 1.2 Hipótesis

Como hipótesis principal se cree que estos incrementos pueden ser causados por descargas eléctricas a tierra cercanas al Observatorio HAWC. La segunda hipótesis es que puedan estar relacionados con variaciones en la presión atmosférica ya que esta presenta un efecto inverso en las cuentas de HAWC.

## 1.3 Contenido

El presente trabajo se divide en dos partes principales; la primera es la parte teórica la cual se desarrolla dentro de los capítulos 1,2,3,4 y la segunda es la parte experimental descrita en los capítulos siguientes. En el primer capítulo se da una breve descripción de los trabajos previos realizados por los observatorios de rayos cósmicos en el mundo que han detectado incrementos en sus conteos. En el segundo capítulo se presenta el tema relacionado con la electricidad en la atmósfera, donde se describen los procesos de cargas y el campo eléctrico en la atmósfera así como un modelo que propone la distribución de las cargas en la Tierra. Para el tercer capítulo se da una descripción de los mecanismos de electrificación de nubes, los tipos de nubes, los principales modelos que describen la distribución de las cargas en las nubes y como se generan los relámpagos. En el cuarto capítulo se da una descripción del funcionamiento del Observatorio HAWC. El quinto capítulo describe el funcionamiento y la adquisición de los datos de los detectores utilizados para la realización de este trabajo. El sexto capítulo muestra los resultados obtenidos durante este trabajo de tesis. Finalmente en el séptimo capítulo se discuten los resultados, se presentan las conclusiones correspondientes y se propone el trabajo contemplado para un futuro.



# CAPITULO 2

---

## Electricidad en la atmósfera

---

La electricidad básicamente se puede definir como un flujo de cargas. Benjamin Franklin (1774) determinó la existencia de dos tipos de cargas eléctricas a las que llamo positiva y negativa. Los electrones tienen carga negativa y los protones carga positiva. Entre las propiedades básicas de la carga se encuentran que cargas del mismo signo se repelen mientras que cargas de signos opuestos se atraen. En 1860 Kelvin sugirió la existencia de una capa conductora en la parte superior de la ionosfera, ubicada aproximadamente a 60 km de altura, a la que llamó electrosfera por su alta conductividad eléctrica. En esa capa conductora se pueden encontrar cargas eléctricas libres conocidas como iones. Elster y Geitel (1899) propusieron el concepto de iones positivos y negativos como portadores de carga con el fin de explicar la conductividad eléctrica en el aire. Mientras más densidad de iones libres hay en el aire mayor será la conductividad eléctrica.

En un día soleado y sin nubes se puede medir un campo eléctrico  $\mathbf{E}$  con un valor de  $130 \text{ Vm}^{-1}$  (volts por metro) cerca de la superficie de la Tierra. Este campo es llamado campo eléctrico de buen tiempo el cual puede variar desde  $-50 \text{ Vm}^{-1}$  hasta más de  $300 \text{ Vm}^{-1}$  dependiendo de las condiciones del lugar de la medición. La causa principal de la formación de este campo es la separación de la carga que se produce entre la tierra y la ionosfera.

## 2.1 Cargas en la atmósfera

Existen dos mecanismos naturales por los cuales se pueden producir cargas en la atmósfera terrestre, ambos relacionados con la ionización de moléculas neutras. El primer mecanismo proviene del espacio exterior como son: los rayos cósmicos que se originan en supernovas y en explosiones de estrellas, así como de los rayos X y los rayos ultravioleta provenientes del Sol. Cuando estos rayos cósmicos entran a la atmósfera colisionan con las moléculas de nitrógeno y oxígeno, liberando algunos de sus electrones y partículas subatómicas siendo los principales productores de iones en la atmósfera. El segundo mecanismo proviene de la radiactividad natural que produce la superficie de la Tierra, debido a que la corteza terrestre contiene isótopos radiactivos que emiten partículas de alta energía (alfa y beta) así como radiación gamma.

La ionización causada por la radiactividad natural contribuye sólo a la mitad de las cargas cerca de la superficie terrestre, mientras que la ionización debida a la radiación cósmica aporta la otra mitad y casi toda la carga en la atmósfera. A alturas superiores a 1 km la mayoría de los iones son producidos por los rayos cósmicos. Por encima de los 60 Km la radiación solar ultravioleta (UV) es la principal fuente de ionización. La relación de la concentración de iones positivos a la concentración de iones negativos en el aire cerca de la superficie es de  $\sim 1.2$ , lo que nos dice que existen 20 % más cargas positivas que negativas en el aire. La existencia de iones en la atmósfera es la razón fundamental de la electricidad atmosférica, sin iones no tendríamos campo eléctrico de buen tiempo y muy probablemente tampoco tormentas eléctricas.

## 2.2 Campo eléctrico en la atmósfera

La superficie de la Tierra tiene una densidad media de carga de  $-1.1 \times 10^{-9} \text{ Cm}^{-2}$  (colombs por metro cuadrado). Se puede calcular la carga total de la Tierra, dado que la superficie de la Tierra es aproximadamente  $5 \times 10^{14} \text{ m}^2$ , la carga total de la Tierra sería  $\sim -5.5 \times 10^5 \text{ C}$ , lo que implica que la superficie de la Tierra debe de tener un cierto potencial eléctrico  $\phi_0$ . Se puede determinar la distribución de potencial  $\phi$  alrededor de la Tierra mediante la aproximación de un condensador

esférico con carga  $-5.5 \times 10^5$  C. Sabemos que si no hay cargas en el aire el potencial eléctrico  $\phi$  alrededor de un condensador debe de satisfacer la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad (2.1)$$

En donde el cero de lado derecho de la ecuación (2.1) indica que no hay cargas eléctricas en la atmósfera, la solución implica las siguientes condiciones a la frontera  $\phi = \phi_0$  cuando  $r = R$  y  $\phi = 0$  cuando  $r \rightarrow \infty$

$$\phi = \frac{\phi_0 R}{r}, \quad (2.2)$$

donde  $R$  es el radio de la Tierra y  $r$  es la distancia radial desde el centro de la Tierra. El campo eléctrico se define como el gradiente negativo del potencial eléctrico,

$$\vec{\mathbf{E}} = -\nabla \phi = \frac{\phi_0 R}{r^2} \hat{e}_r, \quad (2.3)$$

de (2.3) vemos que la magnitud del campo eléctrico disminuye con la altura proporcionalmente a  $1/r^2$ . Pero las mediciones de la variación vertical del campo  $\mathbf{E}$  no coinciden con la ecuación (2.3), ya que muestran una disminución casi exponencial con la altura, de un valor de 130 V/m a 100 metros de altura hasta 45 V/m a un kilómetro, llegando hasta 1 V/m a 20 Km, estos valores dependen en gran medida de las condiciones del lugar. Gish (1944) sugirió el siguiente ajuste empírico para el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en función de la altura  $z$ :

$$\mathbf{E}(z) = -(81.8e^{-4.52z} + 38.6e^{-0.375z} + 10.27e^{-0.121z}), \quad (2.4)$$

donde las unidades para  $\mathbf{E}$  son  $\text{Vm}^{-1}$  y  $z$  esta dado en Km. El perfil vertical de  $\mathbf{E}$  dado por la ecuación (2.4) implica que el potencial eléctrico no puede ser una solución de la ecuación de Laplace (2.1). Por otra parte, en presencia de cargas es válida la ecuación de Poisson para el potencial:

$$\nabla^2 \phi = \rho(z)/\epsilon_0, \quad (2.5)$$

donde  $\rho(z)$  es la densidad de carga y  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío. Sustituyendo (2.3) y (2.4) en (2.5) obtenemos  $\rho(z)$  como:

$$\rho(z) = 20.4e^{-4.52z} + 0.8e^{-0.375z} + 0.069e^{-0.121z}, \quad (2.6)$$

que es la densidad de carga responsable de la generación del campo eléctrico  $\mathbf{E}$ . Donde el valor de la carga esta dado por  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C. Cerca de la superficie donde  $z=0$  el valor de  $\rho$  sería muy cercano a  $21e \text{ cm}^{-3}$  o  $3.36 \times 10^{-12} \text{ C m}^{-3}$  que es la densidad de carga en el aire (Wang, 2013).

### 2.3 Circuito eléctrico global

El Circuito eléctrico global es un modelo conceptual que se utiliza para describir las características eléctricas de la atmósfera. En este modelo la superficie de la Tierra y la ionosfera pueden ser tratadas como dos placas de un condensador esferico con una diferencia de potencial entre 100 y 300 kV en donde el aire entre estas dos placas sirve como un dielectrico. Wilson (1929) sugirió que las tormentas electricas sirven como generadores electricos que suministran de carga positiva a la ionosfera y carga negativa a la tierra por medio de los relámpagos.

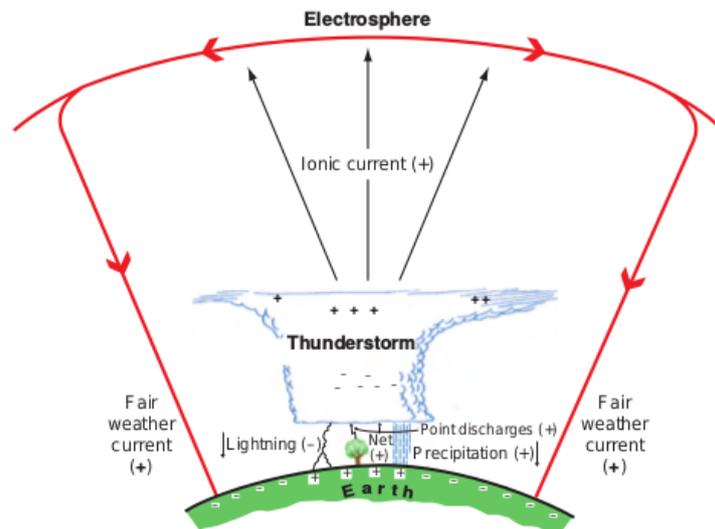


Figura 2.1: Esquema del Circuito Eléctrico Global. (Imagen tomada de Wallace y Hobbs 2006.)

En la figura 2.1 se muestra un esquema del circuito eléctrico global en donde las flechas rojas muestran la dirección en la que fluye la carga, por convención histórica la corriente va en dirección del movimiento de la carga positiva. En la ionosfera superior (electrosfera) se encuentran las cargas positivas y en la superficie de la tierra las cargas negativas. En la parte central se muestra una nube de tormenta la cual funciona como un generador de cargas, donde las cargas positivas fluyen desde la parte superior de la nube hacia la electrosfera. Y desde la parte inferior de la nube por medio de descargas eléctricas las cargas negativas fluyen hacia la superficie de la tierra.

Debido a la presencia del campo eléctrico de buen tiempo, los iones en el aire están sujetos a una fuerza eléctrica y son acelerados en dirección de la carga. Este flujo de cargas constituye una corriente eléctrica, la magnitud de la corriente no es constante pero en promedio, se encuentra en  $3 \times 10^{-12} \text{ Am}^{-2}$ , que representa la densidad de corriente. Por medio del campo eléctrico de buen tiempo las cargas positivas se escapan hacia la superficie de la tierra. Si se multiplica la densidad de corriente por la superficie de la Tierra obtenemos que la corriente que fluye en el aire es de 1500 A. Esta es la corriente encargada de llevar cargas positivas a la superficie para neutralizar a las cargas negativas, por lo que es llamada corriente de fuga.



# CAPITULO 3

---

## Electrificación de nubes

---

### 3.1 Nubes

La principal fuente generadora de los relámpagos son las nubes del tipo cumulonimbus también conocidas como nubes de tormenta. Las nubes están compuestas principalmente por pequeñas gotas de agua líquida y pequeños cristales de hielo, se forman cuando el agua líquida de la superficie de la Tierra es calentada por la luz solar convirtiéndola en vapor de agua, este vapor es llevado hacia arriba por el aire caliente que se eleva desde la superficie, a medida que el aire se enfría el vapor se convierte de nuevo en agua. El aire frío hace que las gotas de agua se adhieran a partículas microscópicas como polvo, polen o sales de mar. Cuando las gotas de agua se hacen más grandes, se vuelven más pesadas y por medio de gravedad caen hacia la superficie en forma de precipitación, ya sea como lluvia, nieve o granizo. La evolución de una nube en el tiempo se rige por una serie de procesos dinámicos, de radiación y microfísicos.

Las nubes se pueden clasificar de acuerdo a su forma y a la altura a la que se encuentran. El esquema de clasificación de nubes que se utiliza hoy en día fue propuesto por Jean Baptiste Lamarck un biólogo francés que clasificó las nubes de acuerdo a su altura de formación (alta, media o baja) y a Luke Howard un químico

ingles quien sugirió que las nubes podrían agruparse en cuatro categorías principales de acuerdo a su apariencia: Cirrus (del latín, pelo rizo), Cúmulos (montón), Stratos (capas) y Nimbus (lluvia). En la figura 3.1 se muestran los tipos de nubes agrupadas de acuerdo a la altura a la que se forman. Las nubes bajas llegan a alcanzar una altura máxima de 2 km por encima de la superficie, tienen el prefijo "Strato" y se dividen en Stratocumulos y en Stratus. Las de nivel medio se forman a una altura entre 2 y 7 km, tienen el prefijo "Alto" y se dividen en Altocumulos y en Altostratus además de que en este grupo se encuentran las nimbostratus que forman entre las nubes bajas y las de nivel medio. En el nivel alto se encuentran las nubes por encima de 7 km, tienen el prefijo "Cirro" y se encuentran tres tipos de nubes, las Cirrostratus, Cirrus y Cirrocumulus.

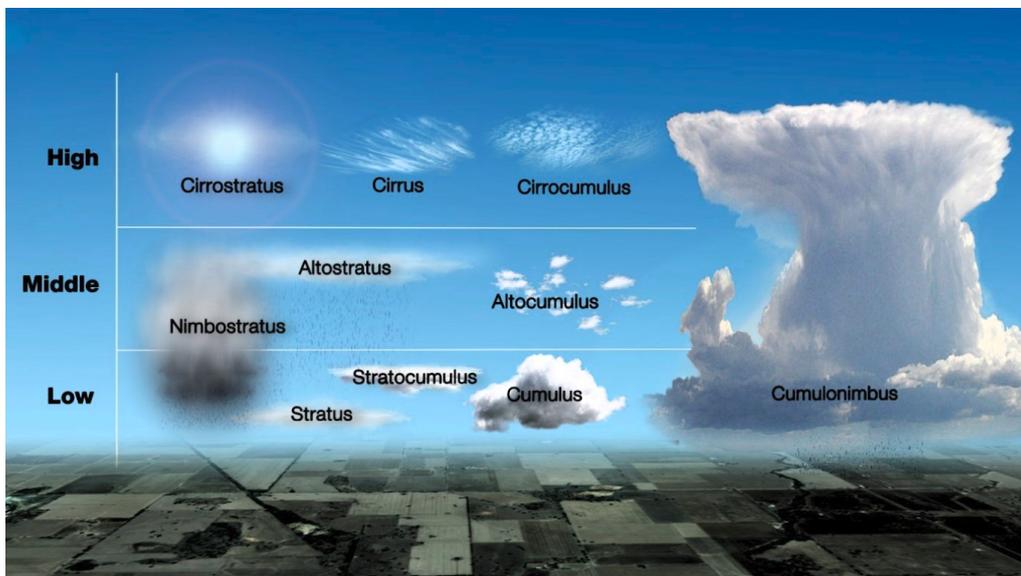


Figura 3.1: Esquema de los diferentes tipos de nubes (Imagen tomada de <http://media.bom.gov.au/social/blog/895/whats-that-cloud/>).

También se encuentra el grupo las nubes conocido como de gran extensión vertical, aquí es donde se encuentran las Cumulus y las Cumulonimbus que son las encargadas de generar tormentas eléctricas y lluvias muy intensas. Pueden crecer a tal altura que llegan a formar una capa superior de hielo, su base suele encontrarse a menos de 2 kilómetros sobre el suelo mientras que la cima puede alcanzar una altura de 10 a 20 kilómetros y variar horizontalmente de 3 km hasta poco menos de 50 km (Lamb y Verlinde 2011).

## 3.2 Estructura eléctrica de las nubes de tormenta

La estructura de carga eléctrica más común y simplificada de una nube de tormenta se muestra en la figura 3.2. En la parte superior de la nube se encuentran las cargas positivas en donde la temperatura promedio es de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en esta región principalmente se encuentran pequeños cristales de hielo o nieve lo suficientemente ligeros para ser llevados hacia arriba por las corrientes ascendentes. De la mitad hacia abajo se encuentran las cargas negativas, esta región de la nube se compone por pequeñas gotas de lluvia y granizo que son un poco más pesadas por lo que tienden a permanecer en la parte inferior de la nube en donde la temperatura promedio es de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Formando un dipolo principal que está compuesto por la región superior de carga positiva y la región central de carga negativa. Cerca de la base de la nube se encuentra una pequeña región cargada positivamente. Se pueden generar 4 tipos de descargas eléctricas entre las que se encuentran: las que se producen dentro de la propia nube, desde la nube al aire, de nube a nube o entre la nube y la superficie de la tierra.

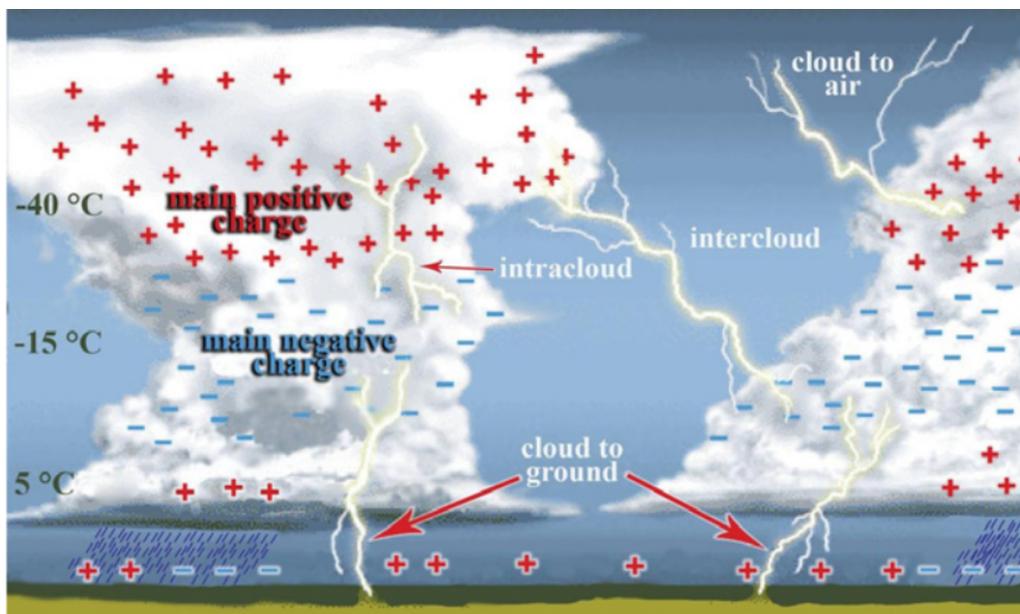


Figura 3.2: *Distribución de las cargas dentro de las nubes.* (Imagen tomada de Dwyer y Uman 2014.)

La distribución y el movimiento de las cargas dentro de una nube de tormenta depende principalmente de los hidrometeoros que son partículas de agua líquida o congelada. El movimiento de los hidrometeoros es causado por la influencia de la gravedad con velocidades de caída mayores 3 m/s los cuales son llamadas partículas de precipitación.

### **3.3 Mecanismos de carga en las nubes**

Existen varias teorías acerca de los mecanismos de carga dentro de una nube, estos mecanismos se dividen en convectivos que hacen referencia a la dinámica de la nube y en colisionales que a su vez se dividen en mecanismos inductivos los cuales requieren la presencia de un campo eléctrico y los no inductivos que funcionan sin la influencia del campo eléctrico. La teoría más aceptada para la formación del dipolo dentro de una nube de tormenta es la teoría de carga convectiva.

#### **3.3.1 Teoría de carga convectiva**

La teoría de carga convectiva se basa en el movimiento de las cargas por medio de corrientes de convección natural dentro de una nube de tormenta. Durante la formación de la nube de tormenta las cargas positivas son llevadas hacia arriba por corrientes ascendentes formando una región de carga positiva en la parte superior de la nube como se muestra en la figura 3.3. Esta región de carga genera una capa de apantallamiento de carga negativa en la parte superior. Durante el crecimiento de la nube la cima y los bordes son regiones de corriente descendente por lo que las gotas con carga negativa son llevadas a la parte baja de la nube, mientras que el centro de carga continua en ascenso hasta la parte superior, de esta manera una separación de carga positiva y negativa se establece en la nube.

#### **3.3.2 Mecanismos de carga inductiva**

Cuando se coloca un objeto en presencia de un campo eléctrico externo se generan cargas inducidas en el mismo. De este modo las partículas de precipitación dentro de la nube tendran cargas inducidas debidas a un campo eléctrico.

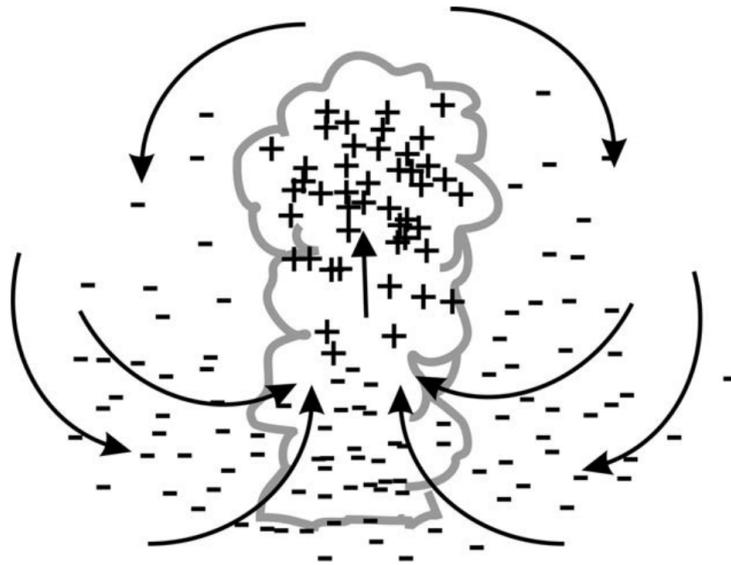


Figura 3.3: *Modelo conceptual de la carga por convección (Imagen tomada de Wang, P.K 2013 ).*

### Captura de iones

Con la presencia del campo eléctrico de buen tiempo una gota en la nube puede ser polarizada de acuerdo a la figura 3.4. Supongamos que la gota cae en el aire lleno de iones de ambos signos y la parte inferior de la gota está polarizada positivamente la cual atrae los iones negativos y repele los positivos, esto hará que la parte superior adquiera carga positiva, a medida que cae la gota atrae iones negativos que al ser capturados dan como resultado la separación de cargas. Este modelo sólo es efectivo en un campo eléctrico débil, por lo que no es suficiente para la producción de descargas eléctricas (Wang 2013).

### Carga por ruptura de gota

Las gotas de agua pueden llegar a romperse cuando caen y si por medio de la caída son polarizadas por el campo eléctrico existente es muy posible que después la ruptura la parte superior de la gota lleve cargas negativas mientras que la parte inferior cargas positivas. Durante el proceso de ruptura la parte superior se rompe en muchas gotitas que llevan cargas negativas mientras que en la parte inferior se forma un anillo de agua y se rompe en gotas portadoras de carga positiva. Después

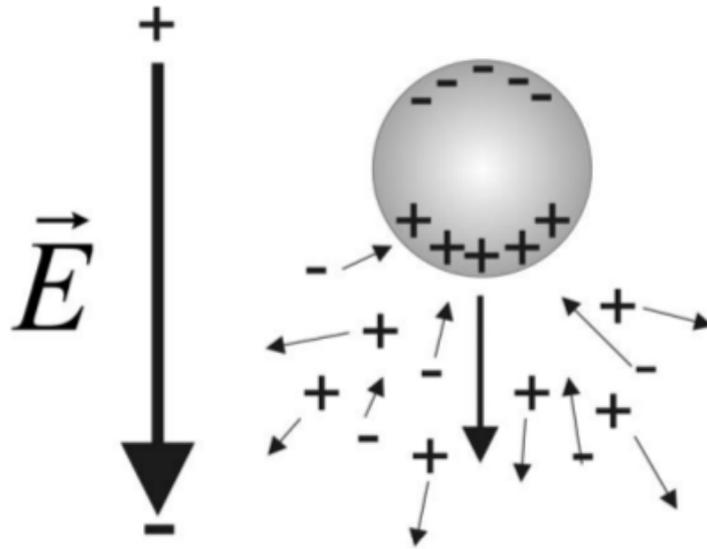


Figura 3.4: Esquema de la captura de iones. (Imagen tomada de Wang 2013)

de la ruptura se tienen cargas positivas en el nivel inferior y negativas en el superior. Lo que da una configuración equivocada de acuerdo al modelo bipolar por lo que no se considera un buen modelo para la reconstrucción de los principales centros de carga pero se piensa que este modelo puede contribuir a la región de carga positiva en la parte inferior de la nube.

### Carga por rebote de partículas durante la colisión

Las partículas de la nube (agua o hielo) durante una colisión dentro de las nubes pueden llegar a rebotar o a unirse unas con otras, si estas partículas también están polarizadas por el campo eléctrico de buen tiempo, el resultado del rebote sería la separación de cargas. Cuando una partícula grande colisiona con una partícula más pequeña de arriba hacia abajo como en la figura 3.5 el proceso de colisión describe cargas positivas en la mitad inferior de la partícula grande que es neutralizada por las cargas negativas de la mitad superior de la partícula más pequeña. Después del rebote la partícula grande tendrá carga negativa y la más pequeña carga positiva por lo que se da la separación de cargas. De acuerdo a algunos estudios se dice que este mecanismo puede ser suficiente para producir la descarga eléctrica.

Sin embargo se tienen que tomar en cuenta varios factores en el rebote ya que la distribución de la carga inducida sobre la partícula es también en función del ángulo, de este modo la colisión y el rebote se puede producir no sólo la separación de cargas ya que también se puede producir la descarga.

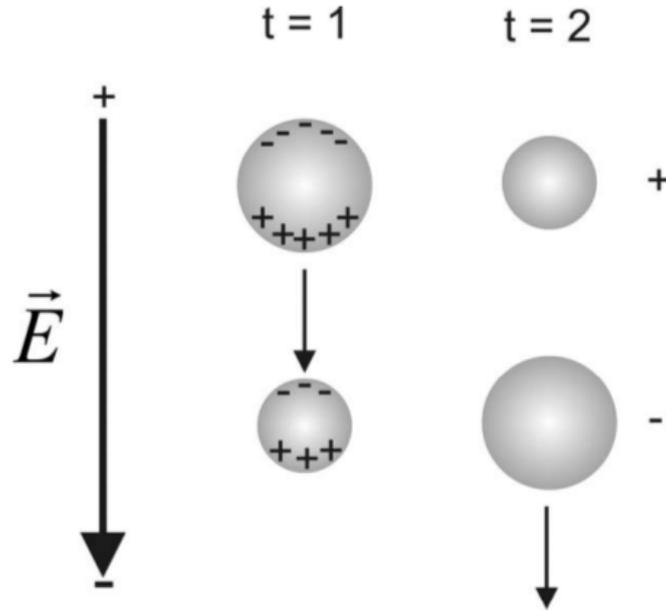


Figura 3.5: Esquema de la carga por rebote de partículas. (Imagen tomada de Wang 2013)

### 3.3.3 Mecanismos no inductivos

#### Efecto termoeléctrico

Cuando una partícula de la nube colisiona con un cristal de hielo de diferente temperatura puede existir transferencia de carga debido al gradiente de temperatura sobre el punto de contacto. En ese momento los iones  $H^+$  en las partículas más calientes tienen mayor movilidad que los iones  $OH^-$  y por lo tanto hay transferencia de cargas positivas que se mueven hacia el cuerpo más frío, lo que implica que las partículas más calientes ganan cargas negativas mientras que las partículas más frías llevan cargas positivas. Estudios señalan que se requieren grandes velocidades de impacto, diferencias de temperatura grandes y que las áreas de contacto deben de

producir suficientes cargas en las partículas, lo que es un poco probable dentro de la nube.

#### **Carga debido a la fractura de gotas congeladas**

Cuando una gota se congela su capa de hielo exterior se puede fracturar y producir pequeñas astillas. Estas astillas de hielo pueden tener carga positiva mientras que las partículas de hielo tiene carga negativa por lo que se da la separación de cargas. Se dice que este modelo puede producir la configuración de polaridad correcta para un dipolo de cargas, sin embargo el problema se da en que la fractura no ocurre muy frecuentemente y de ser así la cantidad de fragmentos debe de ser muy poca.

#### **Carga debida a las burbujas de aire que escapan de la fusión de granizo blando (Efecto Dinger-Gunn)**

Cuando un granizo comienza a derretirse, las burbujas de aire atrapadas son liberadas al medio ambiente en forma de burbujas, creando pequeñas gotas cargadas negativamente mientras el hielo que queda adquiere carga positiva, este fenómeno también es llamado efecto Dinger-Gunn y puede producir suficiente carga para contribuir con cargas positivas a la parte inferior de la nube.

### **3.4 Relámpagos**

El relámpago es uno de los fenómenos naturales más poderosos de la Tierra, producen la luz más brillante y el sonido más fuerte. Han estado presentes en la historia de la humanidad desde sus inicios pero su investigación científica comenzó apenas hace dos siglos. La física del relámpago es considerada por muchos científicos como un fenómeno que no se ha logrado entender en su totalidad, por lo que aún queda mucho campo de estudio.

Se considera que fue Benjamín Franklin el primero en investigar de manera científica el relámpago gracias a sus trabajos de electricidad en su laboratorio. En 1774 demostró que la carga en la parte inferior de una nube de tormenta es negativa. Después del trabajo realizado por Franklin hubo muy poco avance significativo en la comprensión del relámpago y fue hasta finales del siglo XIX con la llegada de la

fotografía y la espectroscopia que se pudieron realizar nuevas investigaciones, como la realizada por Schuster en 1880 quien hizo la primera identificación sistemática de las líneas en el espectro de los rayos. Con la invención de la cámara de barrido en 1900 fueron posibles grandes avances en la comprensión de los principales aspectos de la fenomenología del relámpago de nube a tierra. Las primeras mediciones de la corriente de un relámpago fueron realizadas por Pockels en 1900 en Alemania, quien analizó el campo magnético inducido en una roca de basalto por un relámpago. Más tarde Slipher obtuvo el primer registro fotográfico del espectro de relámpagos.

Wilson (1929) fue el primero en utilizar mediciones de campo eléctrico para entender la estructura de las nubes de tormenta, así como el tipo de cargas que están involucradas en el proceso de descarga. Scholand (1930) en Sudáfrica mostró que los relámpagos descienden con carga negativa hacia la tierra. La carga eléctrica de un relámpago la determinó Meese y Evans (1962) en un rango de 140 a 250 coulombs. Recientemente se han descubierto nuevos fenómenos asociados a descargas eléctricas como los "Transient Luminous Events" (TLE), Sprites de diversos tipos (red-Sprite y Sprite-halo) blue jets, y elves, que se originan en el aire encima de las nubes de tormenta, incluyendo los "terrestrial gamma ray flashes" (TGFs) observados por satélites en órbita que son asociados a tormentas eléctricas.

### 3.4.1 Generación de relámpagos

Uman (1969) definió al relámpago como una descarga eléctrica de alta corriente transitoria cuya longitud es del orden de kilómetros. Los relámpagos se producen cuando existe una diferencia de potencial entre dos puntos debida a una acumulación de carga ya sea entre la parte inferior de una nube y la superficie de la Tierra, entre la nube y el aire, dentro de una nube y entre nubes. El 25% de las descargas de relámpagos son generadas de nube a tierra y el 75% restante no tocan el suelo. La principal fuente generadora de relámpagos son las nubes del tipo Cumulonimbus también conocidas como nubes de tormenta, el campo eléctrico medido en estas nubes es  $1-4 \times 10^5$  V/m (Rakov y Uman 2003). En todo el mundo se producen de 30 a 100 relámpagos por segundo, resultando un valor aproximado de 9 millones de relámpagos al día. El paso de la corriente eléctrica entre la nube y la superficie de la tierra ioniza las moléculas de aire y causa un destello de luz como se puede observar en la figura 3.6.



Figura 3.6: *Fotografía de un relámpago. (Tomada de science.nasa.gov)*

La duración total de un relámpago es de orden 0.2 segundos y la corriente promedio transferida puede ser de 1000 A. Una tormenta eléctrica puede producir un relámpago cada 20-30 segundos y tener una duración de 40 a 60 minutos, llegando a cubrir un área de 100-300  $Km^2$  (Dwyer y Uman 2014).

Se cree que el relámpago comienza con una pequeña descarga local entre la región negativa y la región positiva de la base de la nube en donde se generan canales de descarga conocidos como líderes escalonados o "stepped leader" y se desarrollan cuando las diferencias de carga en la nube son grandes. Cuando esto sucede la capacidad de aislamiento de aire se rompe y la carga negativa comienza a moverse hacia abajo en forma de segmentos luminosos. El canal de carga negativo emerge de la parte inferior de la nube y continúa moviéndose hacia el suelo. Cuando el líder escalonado con carga negativa se acerca al suelo se inducen cargas positivas en la tierra, especialmente en los objetos que sobresalen como los árboles o las construcciones altas. Cuando el líder escalonado se encuentra cerca de la superficie entre 10-100 metros induce una carga negativa que atrae las cargas positivas de la superficie produciendo un canal continuo de gas ionizado entre la base de la nube y el suelo (Dwyer y Uman 2014).

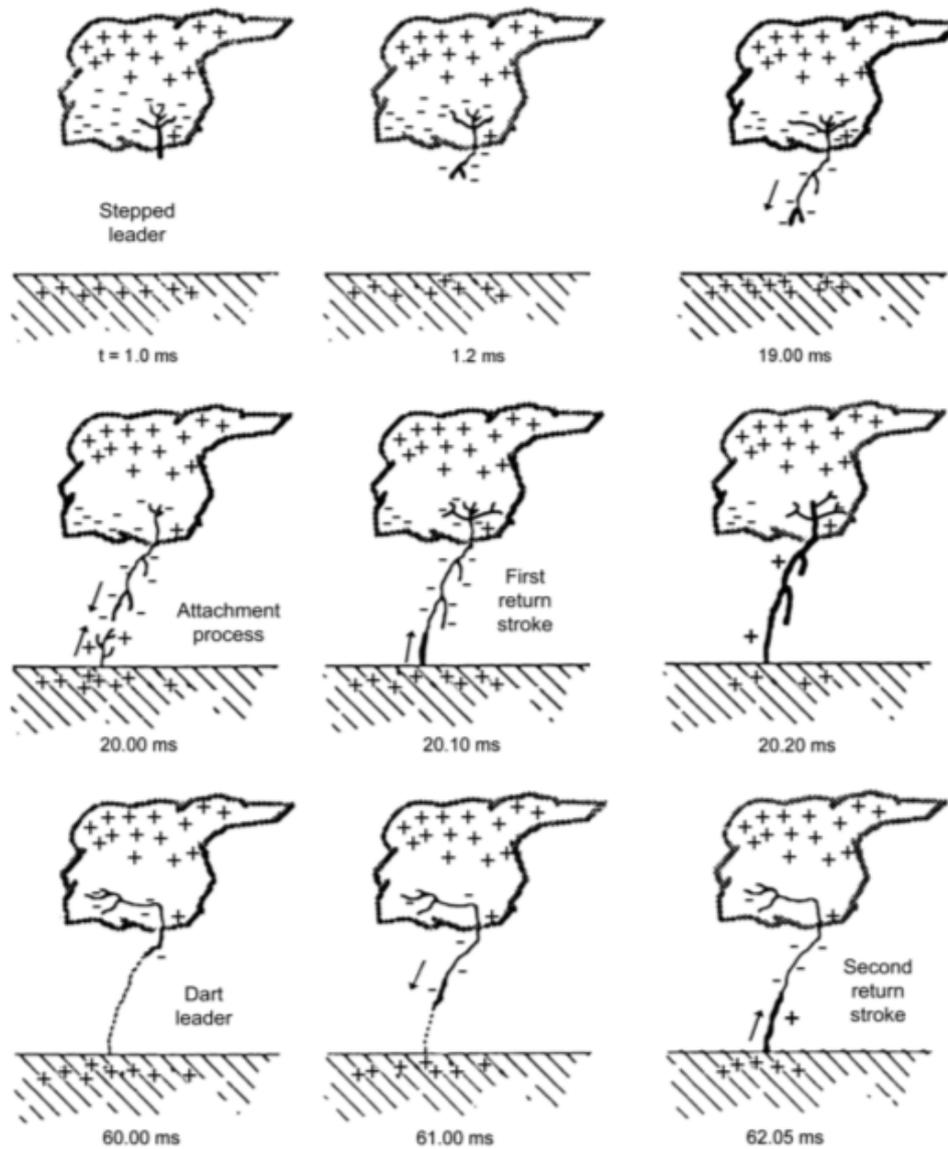


Figura 3.7: Representación del desarrollo de un relámpago de nube a tierra. (Imagen tomada de Dwyer y Uman 2014)

Cuando los canales negativo y positivo se conectan, la carga negativa se mueve violentamente hacia la tierra causando el flujo de grandes corrientes hacia el suelo en donde un destello muy luminoso se mueve hacia la nube a este proceso se le llama "first retur-stroke" o primera carrera de retorno que sigue la trayectoria del lider escalonado. La velocidad de la carrera de retorno es mucho mayor que la del lider

escalonado con un valor promedio de  $1.1 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ , que es la velocidad del rayo mientras que una corriente típica de un "return stroke" es de 30 kA llevando un total de 5 C de carga al suelo. Debido a que la carrera de retorno se mueve hacia arriba tan rápido cerca de  $100 \mu\text{s}$ . Cuando todavía quedan cargas negativas en la nube, se forma otro canal llamado Dart leader que prepara el camino para un segundo return stroke, en donde el canal luminoso va directamente desde la nube al suelo. Cuando la nube queda completamente con cargas positivas es cuando se dan por terminadas las descargas, todo este proceso se ilustra en la figura 3.7.

### **El trueno**

Cuando ocurre la First return stroke se eleva la temperatura del canal de aire a través del cual pasa, por encima de 30000K en un corto período de tiempo de tal manera que el aire no tiene tiempo de expandirse por lo tanto la presión en el canal aumenta de forma casi instantánea a de 10-100 atm, el canal de alta presión se expande en el aire circundante y crea una onda de choque que viaja mas rápido que la velocidad del sonido. El sonido del trueno viene después debido a que la luz viaja más rápido que el sonido, siendo el resultado del calentamiento del aire a casi  $20000^\circ\text{C}$  en unas pocas decenas de microsegundos. Algunos estudios sugieren que el rápido calentamiento hace que el plasma del aire se expanda a velocidades supersónicas formando una onda de choque que provoca un sonido muy fuerte. El trueno se puede escuchar a más de 25 km de distancia de una descarga (Wang, 2013).

# CAPITULO 4

---

## El Observatorio HAWC

---

El Observatorio HAWC por sus siglas en inglés High Altitude Water Cherenkov, que en español significa Observatorio Cherenkov de Agua a Gran Altura, es un detector de rayos gamma de altas energías y de rayos cósmicos único en el mundo, opera en un rango de energías 100 GeV a 100 TeV. Su funcionamiento se basa en la detección de luz Cherenkov en agua, producida por partículas secundarias muy energéticas generadas por las cascadas atmosféricas.

El Observatorio consiste principalmente en un arreglo de 300 detectores de radiación Cherenkov en agua. Se encuentra ubicado dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba en el estado de Puebla, México, a 4100 metros de altura sobre el nivel del mar (figura 4.1). En una meseta entre el Citlaltepelt también llamado Pico de Orizaba y Tiltepetl o Volcán Sierra Negra, con latitud  $18^{\circ} 59' 41''$  Norte y longitud  $97^{\circ} 18' 28''$  Oeste. La latitud a la que se encuentra HAWC proporciona una excelente visibilidad de los objetos celestes y buenas condiciones climatológicas.

HAWC es un proyecto binacional entre México y Estados Unidos, en colaboración con 30 instituciones, como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en México por mencionar las más importantes. Se construyó en un periodo de 4 años, con una inversión de 15 millones de dólares, su financiamiento estuvo a cargo de la Consejo

Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la National Science Foundation (NSF) y del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE). HAWC entró en operación en agosto de 2013 con sólo 30 detectores y fue inaugurado oficialmente el 20 de marzo de 2015.

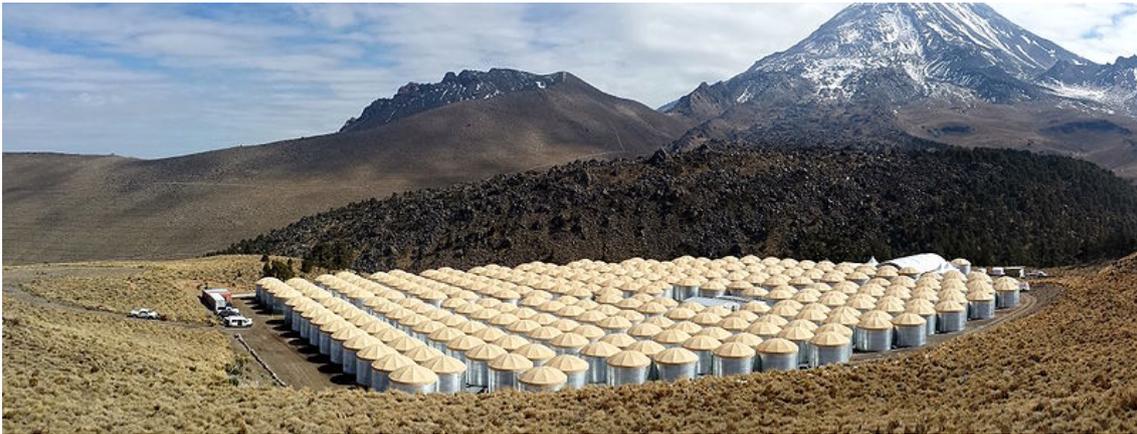


Figura 4.1: *Fotografía del Observatorio HAWC el día de su inauguración el 19 de marzo de 2015. (Imagen tomada de <http://www.hawc-observatory.org/>)*

En comparación con otros observatorios, HAWC puede observar el cielo las 24 horas del día, los 365 días de año, sin importar las condiciones meteorológicas del lugar, ni la estación del año, ni mucho menos si es de día o de noche por lo que se vuelve un instrumento ideal para el estudio de fenómenos transitorios. Tiene un cono de detección de  $45^\circ$  con respecto al cenit con lo que puede observar el 66% de la bóveda celeste.

HAWC puede detectar fuentes de rayos gamma midiendo sus flujos y espectros, llevando a cabo un estudio del cielo en altas energías, en todo el espectro continuo en TeV, lo que le permite explorar el origen de los rayos cósmicos y siendo posible la búsqueda de una nueva física en ese intervalo de energías. También es un excelente instrumento para el estudio de la emisión difusa de rayos gamma, los espectros de alta energía de fuentes de rayos gamma galácticos incluyendo pulsares y remanentes de supernovas y la emisión transitoria de objetos extra galácticos como Estallidos de rayos gamma (GRB's Gamma Ray Burst) y Núcleos activos de galaxias.

---

Entre los principales objetivos del Observatorio HAWC se encuentran:

- Observar el cielo en rayos gamma de alta energía en el rango de TeV. HAWC proporcionará un mapa del cielo TeV con una cobertura diaria de  $2\pi$  sr. Buscará fenómenos transitorios como GRBs y AGN, además de contribuir al estudio de diferentes longitudes de onda desde el radio hasta los rayos gamma en TeV. Será capaz de proporcionar alertas para otros instrumentos, para que puedan seguir con observaciones detalladas de cualquier región de fuentes descubiertas por HAWC.
- Elaborar un mapa de la emisión difusa de rayos gamma de muy alta energía. La emisión difusa se produce cuando los rayos cósmicos interactúan con el gas interestelar y producen piones, que posteriormente se desintegran en rayos gamma. Por tanto, la medición del flujo difuso se puede utilizar para encontrar regiones de aceleración de los rayos cósmicos de la galaxia. HAWC está en una excelente posición para medir el espectro de rayos gamma difusos a energías superiores a 10 TeV.
- Determinar el espectro de los rayos gamma de alta energía de fuentes astrofísicas dentro de la galaxia, para determinar si son o no fuentes de rayos cósmicos galácticos.
- Monitorear fuentes conocidas y descubrir nuevas fuentes de emisión difusa y puntual de rayos gamma de muy alta energía.
- Aumentar la comprensión de los fenómenos que generan rayos gamma de muy alta energía, como el estudio de AGN puede proporcionar información sobre los mecanismos de aceleración que producen los rayos gamma en TeV. Los rayos gamma VHE en AGN's se producen por la interacción de partículas cargadas aceleradas.
- Aunque no es uno de los propósitos principales de HAWC, la tasa de conteo es sensible a rayos cósmicos, en particular es capaz de detectar partículas provenientes del Sol y de un efecto conocido como decrecimiento Forbush.

## 4.1 Los detectores

El Observatorio está formado por un arreglo de 300 detectores de luz Cherenkov en agua, distribuidos en una superficie plana de  $22500m^2$ , como se muestra en la figura 4.2. Cada detector está compuesto por un tanque cilíndrico de acero galvanizado y corrugado con un diámetro de 7.3 m y una altura de 5 m, en el interior de cada tanque se encuentra un Bladder que es una bolsa negra de poli cloruro de vinilo de 0.015" de espesor, que es la encargada de almacenar los  $200 m^3$  de agua ultra purificada y de proteger a los Tubos Fotomultiplicadores (PMT's) de cualquier fuente de luz externa, quedando el interior del tanque completamente oscuro.



Figura 4.2: *Fotografía aérea del arreglo de los 300 detectores que componen el Observatorio HAWC.*

En cada detector se colocan 4 PMT's anclados al fondo del tanque con el fotocátodo mirando hacia el cielo, con un PMT al centro del tanque y los tres restantes formando un triángulo equilátero entre ellos, cada detector es conectado e instrumentado a un sistema central de adquisición de datos, ubicado en un cuarto de control al centro del arreglo de los detectores, una parte de esta electrónica se utilizó en el Observatorio Milagro. En la superficie del tanque se utiliza una estructura de metal cubierta por una lona formando un domo o tapa para proteger el Bladder y evitar que se acumule agua o nieve sobre el tanque.

En total se utilizan 1200 PMT's de la marca Hamamatsu Photonics, 900 son modelo R5912 con un diámetro en la superficie del fotocátodo de 20 cm que fueron utilizados anteriormente en el Observatorio Milagro y los 300 restantes con modelo R7081 con un diámetro de 25 cm adquiridos para HAWC, con la diferencia de que éstos son de alta eficiencia cuántica por lo que se encuentran ubicados al centro de los tanques. En la figura 4.3 se muestra una imagen de los PMT's.

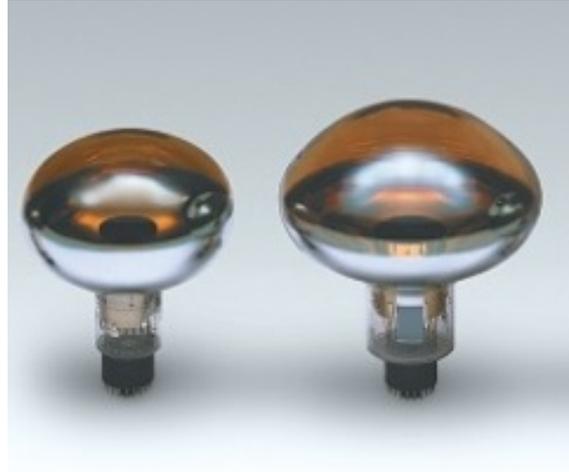


Figura 4.3: Imagen de los tubos fotomultiplicadores R5912 a la izquierda y R7129 a la derecha. (Imagen tomada de Hamamatsu, Photonics K.K. *Photomultiplier tubes and assemblies for scintillation counting and high energy physics*, 2010.)

#### 4.1.1 Tubo Fotomultiplicador

Un tubo fotomultiplicador (PMT) es un dispositivo de detección de luz que convierte la luz que incide sobre su superficie en una corriente eléctrica medible; es un dispositivo muy sensible en las regiones ultravioleta, visible y cercano infrarrojo del espectro electromagnético siendo capaz de multiplicar la corriente producida por la luz incidente en un factor de  $10^3$  hasta  $10^9$ , también puede percibir eventos de un solo fotoelectrón.

El PMT consiste principalmente en un tubo de vidrio sellado con vacío en su interior, una ventana de entrada semitransparente, un cátodo fotosensible (fotocátodo), electrodos de enfoque, un sistema de multiplicación (dinodos) y un ánodo. El diagrama típico de un tubo fotomultiplicador se muestra en la figura 4.4.

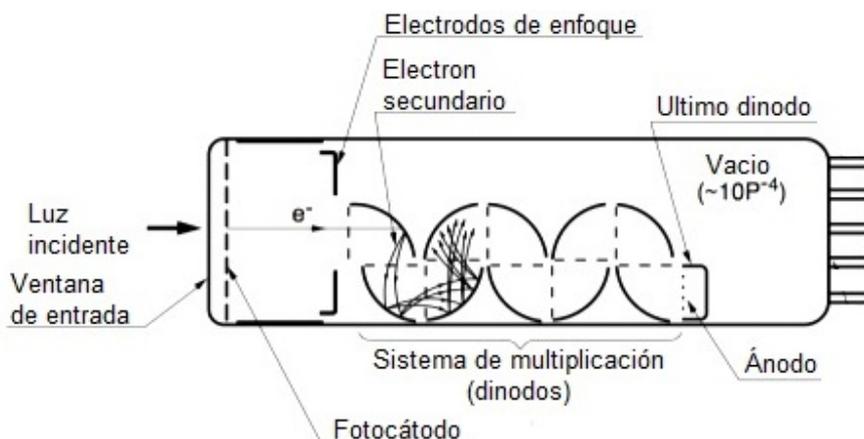


Figura 4.4: *Diagrama típico de las partes que componen al PMT. (Imagen tomada de Hamamatsu, Photonics K.K. Photomultiplier tubes and assemblies for scintillation counting and high energy physics, 2010.)*

Al incidir un fotón por la ventana de entrada, este llega al fotocátodo que es el encargado de convertir al fotón incidente en un fotoelectrón por medio de efecto fotoeléctrico, el fotoelectrón emitido es acelerado y enfocado por el sistema de enfoque mediante un campo eléctrico hacia el primer dinodo del sistema de multiplicación que mediante el proceso de emisión secundaria de electrones se encarga de multiplicar a los fotoelectrones, este proceso se repite en cada uno de los dinodos hasta llegar al ánodo que es el que finalmente recoge todos los electrones para convertirlos en una señal eléctrica de salida.

## 4.2 Principio de funcionamiento

Cuando un rayo gamma de alta energía proveniente de algún lugar del universo atraviesa el espacio y llega a la Tierra, interacciona con las partículas de la atmósfera produciendo una cascada de partículas secundarias, estas se expanden formando un frente de onda con una superficie curva y un centro de cascada como se ilustra en la figura 4.5.

Si la energía de los rayos gamma es lo suficientemente alta y el rayo incidente se encuentra por encima del Observatorio HAWC, estas partículas llegarán a detectores en diferentes posiciones y tiempos. Al entrar en contacto con el agua de los



Figura 4.5: *Imagen de la simulación del frente de onda de una cascada al llegar a los detectores.*

tanques producirán luz Cherenkov que iluminará a los tubos fotomultiplicadores para transformar la luz en una señal eléctrica de salida y al ser iluminados varios tanques con la misma cascada es posible reconstruir el frente de la cascada y por lo tanto la dirección del rayo gamma original y determinar las coordenadas de la posible fuente que lo originó en el universo. Así el patrón de tiempo nos definirá la dirección perpendicular de la superficie de la curva y la distribución de la luz Cherenkov con el arreglo de tanques determinará la posición del centro de la cascada, lo que permite identificar fuentes de rayos gamma en TeV y construir mapas del cielo en ese rango de energías.

### 4.2.1 Rayos Gamma

Los rayos gamma son un tipo de luz millones de veces más energética que la luz visible y que sólo es producida en el universo por fenómenos muy violentos,

por ejemplo: las explosiones de supernovas, centros activos de galaxias, pulsares, destellos de rayos gamma galácticos y extra galácticos.

Se pueden clasificar dentro del espectro electromagnético como se muestra en la figura 4.6 en donde las ondas más largas o de menor frecuencia son conocidas como ondas de radio cuya longitud puede ser de kilómetros hasta metros, las microondas se encuentran en un rango entre 1m y 0.001m, con longitudes de onda más pequeñas se encuentran los rayos infrarrojos en un rango que va desde  $10^{-3}$ m hasta  $7 \times 10^{-7}$ m, después sigue la parte conocida como luz o región visible del espectro que va desde la luz roja  $7 \times 10^{-7}$ m hasta el violeta  $4.5 \times 10^{-7}$ m. Los rayos ultravioleta son ondas electromagnéticas con frecuencias más altas que las visibles y longitudes de onda de  $4 \times 10^{-7}$ m hasta  $1.5 \times 10^{-8}$ m, después siguen los rayos X de aproximadamente  $10^{-8}$ m hasta  $10^{-10}$ m y por último se encuentran los rayos gamma que llegan a tener longitudes de onda hasta  $10^{-13}$ m.

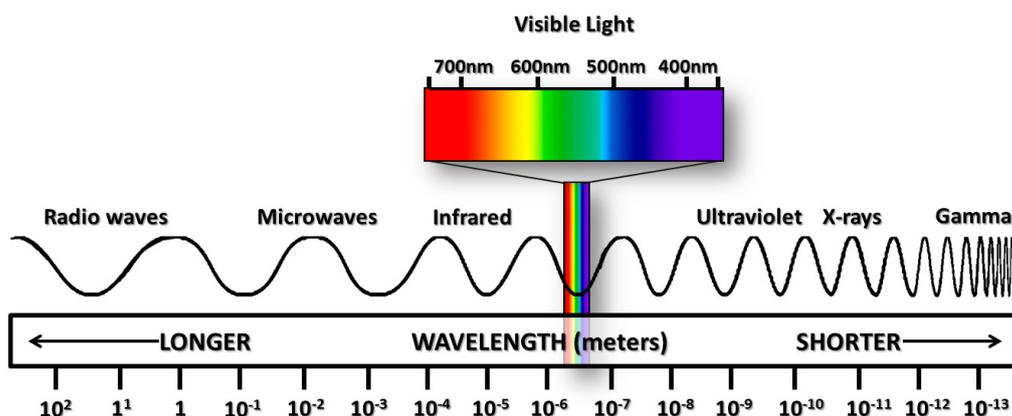


Figura 4.6: *Espectro electromagnético.* (Imagen tomada de <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php>)

Dentro del estudio de los rayos gamma, existen varios rangos de energía para su respectivo análisis, el intervalo de energías para los rayos gamma va de los 100 KeV hasta los 30 PeV. El rango que va desde 100 KeV hasta 30 MeV es conocido como el rango de energía media ME (por sus siglas en inglés Medium Energy). La interacción Compton domina en este intervalo por lo que se utilizan telescopios tipo Compton para su estudio. De 30 MeV hasta 100 GeV se conoce como intervalo de

alta energía HE (High Energy). En este intervalo se utilizan telescopios satelitales que identifican el proceso de producción de pares pues es la interacción dominante. El rango que va de 100 GeV hasta 100 TeV se denomina de muy alta energía, VHE (Very High Energy), el proceso que domina es la producción de pares, los telescopios en el rango VHE utilizan la cascada electromagnética generada en la atmósfera para detectar los rayos gamma. Entre los 30 TeV y 30 PeV se tienen los rayos gamma ultra energéticos UE (Ultra Energy).

### 4.2.2 Cascadas Atmosféricas

Cuando un rayo cósmico primario de alta energía o un rayo gamma interactúa con las partículas de la atmósfera terrestre pierde gran parte de su energía y al entrar en contacto con esas partículas generan otras que interactúan de nuevo hasta perder el resto de su energía generando una reacción en cadena entre las partículas en un proceso que se denomina Cascada Atmosférica. El rayo cósmico primario puede producir un par electrón positrón también de alta energía que a su vez genera rayos gamma por el efecto conocido como *Bremsstrahlung* (radiación de frenado), el proceso se repite generando una cascada de partículas (rayos  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ), hasta que se termina su energía.

Los rayos cósmicos cargados que son en su mayoría protones, se clasifican como hadrones (partículas formadas por un quark) que también producen cascadas al interactuar con la atmósfera llamadas Cascadas Hadrónicas. Un hadrón al chocar con el núcleo de un gas atmosférico, como nitrógeno u oxígeno, produce piones (hadrones formados por dos quarks) y neutrinos, los piones son partículas muy inestables que rápidamente dan lugar a partículas más estables produciendo muones y electrones.

### 4.2.3 Radiación Cherenkov

Cuando la velocidad de una partícula cargada es mayor que la velocidad de la luz en el medio en el que viaja se genera una luz en el espectro ultravioleta formando un cono en la dirección de la partícula, esta luz es la llamada luz Cherenkov (en honor a su descubridor el ruso Pavel Alekseyevich Cherenkov).

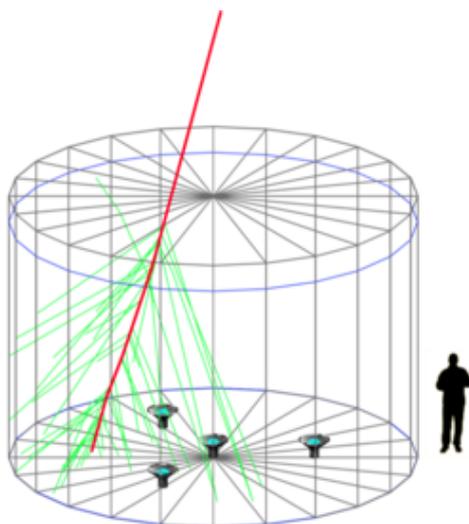


Figura 4.7: Simulación de una partícula entrando a un tanque detector y produciendo luz Cherenkov. (Imagen tomada de Mostafa, 2013.)

La emisión de esta luz Cherenkov sucede cuando una partícula cargada pasa por un medio dieléctrico con una velocidad mayor que la de la luz, genera a su alrededor una serie de dipolos inducidos y un campo de polarización simétrico, provocando posteriormente el retardo del potencial lo que lleva a la ruptura de la simetría del campo de polarización y por lo tanto a la creación de radiación.

El ángulo del cono de la partícula se puede determinar por la ecuación  $\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$  que depende del índice de refracción del medio ( $n$ ) y de la velocidad de la partícula ( $v$ ), donde  $\beta = \frac{v}{c}$  y  $c$  la velocidad de la luz. El agua tiene un índice de refracción de  $n = 1.33$  y de acuerdo a la formula anterior, el cono producido por una partícula con velocidad mayor a la de la luz en el agua es de  $42^\circ$ , lo que implica que la radiación Cherenkov en el interior del tanque será vista por al menos uno de los cuatro PMT's.

### 4.3 Sistemas de adquisición de datos

HAWC cuenta con dos sistemas independientes de adquisición de datos (Data Acquisition System). El sistema principal mide el tiempo de llegada y el tiempo por arriba de un umbral (ToT) de los pulsos de los PMT's. El segundo DAQ es el sistema de Scalers que se basa en el conteo de los pulsos de cada PMT.

La señal de cada uno de los PMT's es enviada por medio de un cable coaxial a un cuarto de control llamado "Counting House". En la figura 4.2 se puede apreciar su ubicación en el centro del arreglo de detectores. Allí se digitalizan las señales por medio de tarjetas TDC, cada tarjeta puede digitalizar 128 señales procedentes de 128 PMT's, en total se utilizan 11 TDC's de las cuales 10 son utilizadas para los PMT's y la onceava se usa para registrar los tiempos. Una vez digitalizadas las señales pueden ser leídas por una computadora para su almacenamiento.

#### 4.3.1 DAQ principal

El DAQ principal registra los eventos individuales causados por las cascadas atmosféricas que llegan a ser lo suficientemente grandes para iluminar simultáneamente una fracción del arreglo de detectores de HAWC. De acuerdo al número de PMT's activados durante una ventana de tiempo dada por medio de una condición de disparo (Trigger), una señal es emitida y enviada a los TDC el cual almacena los tiempos medidos de las señales de los PMT's a la hora de su activación. La ubicación del núcleo de la cascada se puede estimar a partir de la distribución espacial de la activación de los PMT's y la dirección se calcula de acuerdo a los tiempos de llegada a través del arreglo, la energía se puede estimar a partir del número de PMT's activados.

#### Trigger

El Trigger crea una condición de disparo basada en el número de señales que llegan a los front-end-board que es lo que se conoce como multiplicidad simple de disparo. Si se satisface la condición de disparo, el TDC almacena los datos. La mayoría de los disparos son producidos por las cascadas atmosféricas producidas por los rayos cósmicos, cuando se emite un disparo los datos de todos los PMT's son registrados en un tiempo de 1-2  $\mu$ s.

#### 4.3.2 DAQ secundario

El DAQ secundario, opera en un modo de conteo de pulsos de los PMT's, es sensible a rayos gamma, a rayos cósmicos y a actividad solar, así como a eventos transitorios que producen incrementos o disminución repentina en las tasas de conteo con respecto a las producidas por las cascadas atmosféricas.



# CAPITULO 5

---

## Análisis de datos

---

Para el presente trabajo se utilizaron distintas bases de datos entre las que se encuentran: datos del DAQ principal del Observatorio HAWC, de la WLLN (World Wide lightning Location Network) que es una red mundial de detección de relámpagos a tierra, de un detector de campo eléctrico EFM-100 instalado en el sitio, y de una estación meteorológica que cuenta con sensores de temperatura, presión atmosférica, humedad, velocidad del viento, luminosidad solar y cantidad de lluvia. Para el análisis de estos datos se realizaron programas en IDL (Interactive Data Language) que es un lenguaje de programación utilizado para el análisis de datos.

### 5.1 TDC Scalers

Los datos de HAWC que se analizaron para este trabajo fueron los del sistema de adquisición principal, los llamados TDC Scalers con el que se obtiene el conteo de los pulsos de cada PMT despues de pasar por un umbral. En la figura 5.1 se muestra el promedio del número de cuentas por minuto de los 300 detectores para todo el mes de enero de 2015. En el eje "X" se muestra el Tiempo Universal (UT) del 1 al 30 de enero de 2015, y en el eje "Y" el promedio del número de cuentas por minuto de los 300 detectores. Cada uno de los paneles representa la multiplicidad 2, 3 y 4. La multiplicidad nos indica cuantos PMT's por detector se

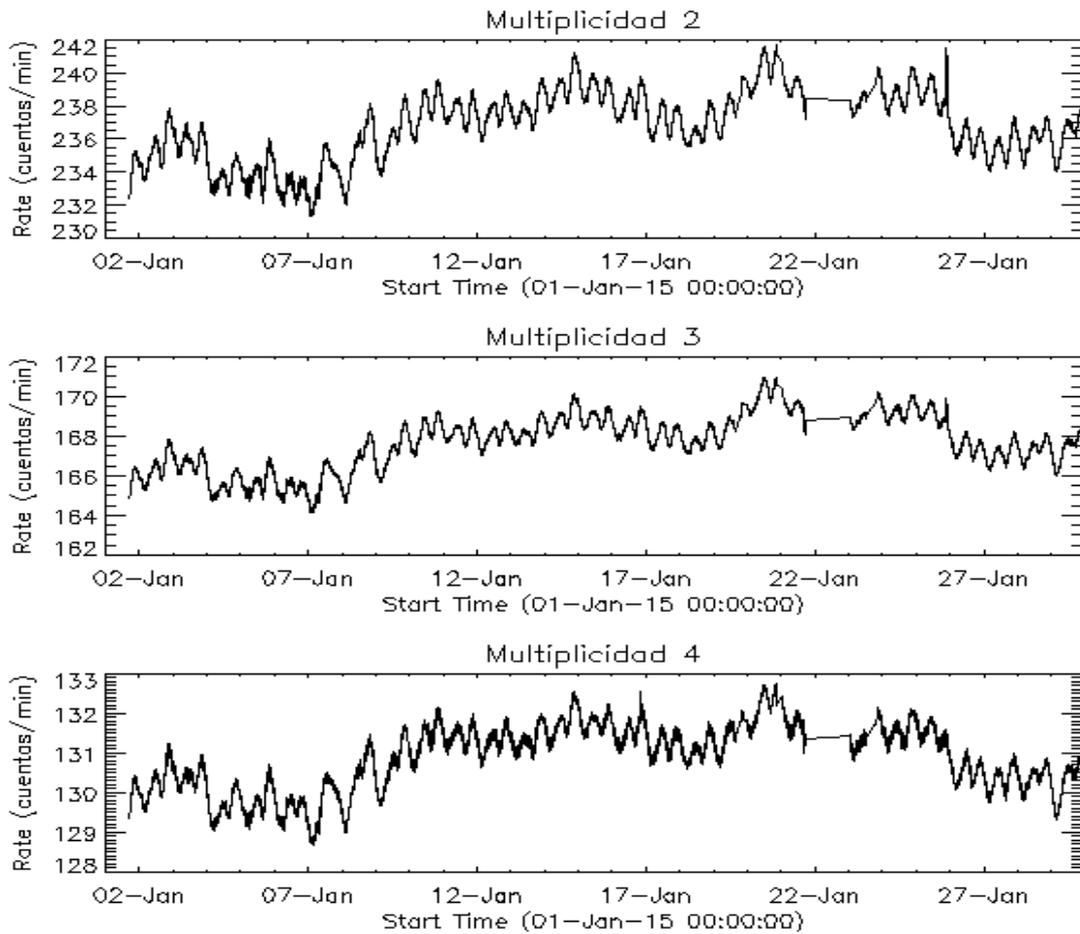


Figura 5.1: Promedio del número de cuentas por minuto obtenidas por HAWC para el mes de enero de 2015, en las 3 multiplicidades.

activaron simultáneamente durante un evento, por ejemplo cuando nos referimos a multiplicidad 2 es porque solo dos PMT's en un detector fueron activados simultáneamente y así sucesivamente hasta la multiplicidad 4 en la que todos los PMT's de un detector son activados al mismo tiempo.

En el panel superior de la figura 5.1 se encuentran los datos de los TDC Scalers en multiplicidad 2, se puede observar que el conteo no es constante en el tiempo ya que presenta oscilaciones diarias, las cuales están relacionadas con variaciones en la presión atmosférica. La línea continua cercana al 22 de enero nos indica que no hay datos en ese periodo de tiempo. El número de cuentas en multiplicidad 2 se

encuentra en un rango de 232 a 242 cuentas/min. En el panel central se muestra el número de cuentas en multiplicidad 3 las cuales están en un rango de 164 a 171 cuentas/min, mientras que en el panel inferior se muestra la multiplicidad 4 en un rango de 128 a 133 cuentas/min. En promedio el número de cuentas/min registradas en la multiplicidad 2 es un 40% más alta que la multiplicidad 3 y un 80% mayor que la multiplicidad 4.

## 5.2 Wold Wide lightning Location Network

La WWLLN es una red mundial de detección de relámpagos a tierra la cual determina la ubicación de los relámpagos generados alrededor de todo el mundo mediante la medición de radiación de muy baja frecuencia (VLF) en un rango de 3-30 kHz que es la producida por el relámpago. La red cuenta con 50 estaciones distribuidas a lo largo de todo el mundo. En la Ciudad de México se encuentra una de estas estaciones ubicada en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Esta red utiliza un método llamado TOGA (Time of group arrival), que es el tiempo que tarda en llegar la señal a un grupo de sensores. Cuando se genera un relámpago a tierra los sitios de detección cercanos reciben una onda que es llamada "sferics" la cual es registrada por las estaciones. Cuando una señal sferics llega a una estación, la información de la hora de llegada y de la posición es enviada a una computadora central para su procesamiento. El algoritmo de localización combina la información de al menos 5 estaciones para determinar la posición del relámpago. Cada estación receptora de ondas es similar y consiste en una antena para medir la señal VLF, un sistema de posicionamiento global, un amplificador y una computadora. La WWLLN tiene un error de  $\sim 4$  km.

La figura 5.2 muestra las posiciones de los relámpagos registrados por la WWLLN para el 8 de noviembre de 2014. En donde se muestra el contorno de la superficie de México, cada cruz representa la posición de cada relámpago a tierra registrado por la red y el cuadro amarillo al centro del mapa representa el lugar donde se encuentra HAWC. Con los datos de esta red se puede conocer el tiempo y la posición de los relámpagos a tierra cercanos a HAWC.

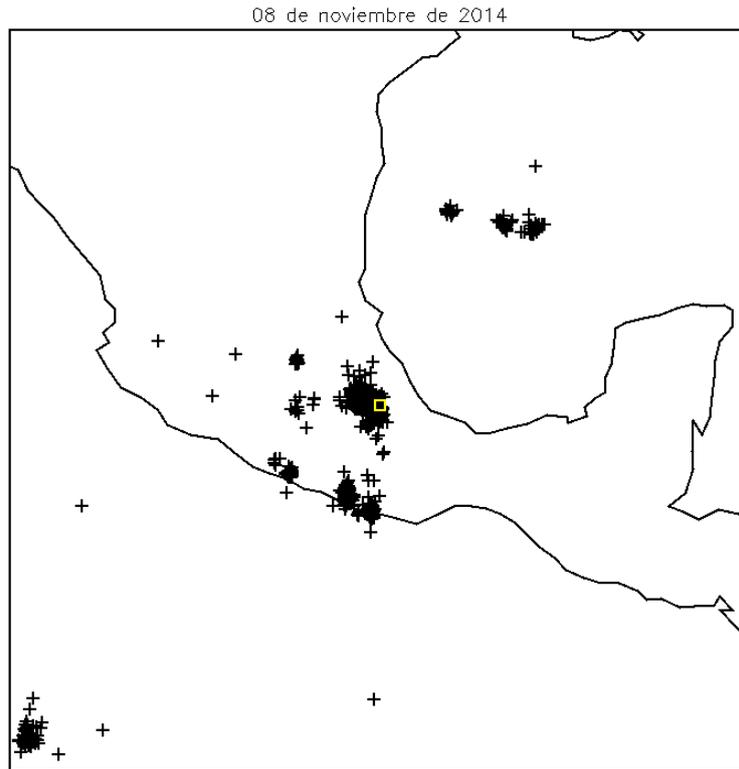


Figura 5.2: *Mapa de relámpagos en México con los datos de la WLLN del día 8 de noviembre de 2014. El cuadro amarillo marca la posición en la que se encuentra HAWC.*

### 5.3 Detector de campo eléctrico EFM-100

Se tiene instalado en el sitio un detector de campo eléctrico de la marca Boltek modelo EFM-100, es un detector de tipo molino con el que se pueden medir las variaciones del campo eléctrico en el aire. Se le llama de molino porque tiene un disco giratorio el cual tiene como función exponer y proteger a sus electrodos del campo eléctrico. La corriente que fluye hacia los electrodos es proporcional a la intensidad del campo eléctrico que se mide en volts por metro (V/m). Los campos eléctricos que generan las tormentas son del orden de kilovolts (kV), un relámpago se puede detectar como un cambio repetino en la intensidad del campo eléctrico. Las mediciones más comunes de campo eléctrico son cerca de la superficie de la Tierra, en donde se puede medir un campo promedio de 100 V/m en ausencia de nubes.

### Interpretación de datos

En la figura 5.3 cuando una nube de tormenta se acerca al detector de campo, son detectadas las cargas positivas entre la nube y el detector por lo que muestra un aumento en la parte positiva del campo eléctrico, pero cuando la nube de tormenta se encuentra encima del detector predominan las cargas negativas por lo que se registra una inversión en el campo eléctrico hacia la parte negativa, una vez que la nube se aleja el campo eléctrico vuelve a registrar un aumento hacia la parte positiva para volver al valor del campo eléctrico de buen tiempo  $0.1\text{kV/m}$ . Cuando se produce un relámpago se observa como una disminución repentina del campo eléctrico.

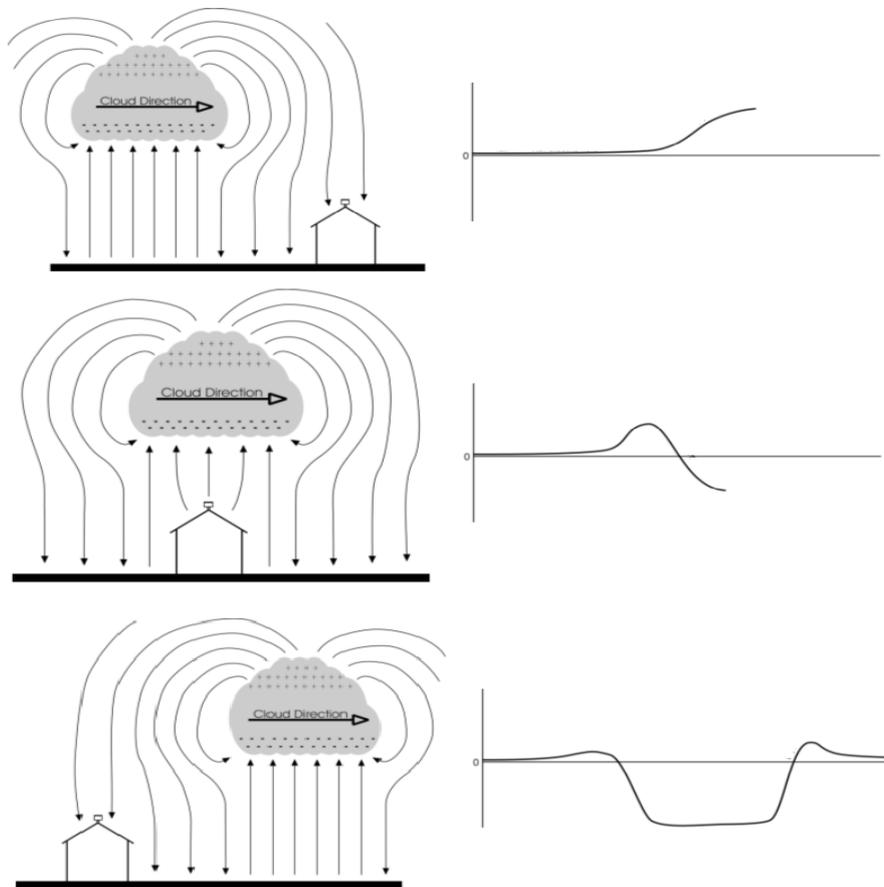


Figura 5.3: Interpretación de los datos de campo eléctrico. (Imagen tomada del manual de Boltek EFM-100)

## 5.4 Estación meteorológica

Para el estudio de fenómenos atmosféricos se requiere del conocimiento de una serie de variables meteorológicas, las cuales presentan variaciones en el espacio y tiempo. En el Observatorio HAWC se encuentra instalada una estación meteorológica con sensores de temperatura, humedad, presión, precipitación, radiación solar y velocidad del viento.

### Temperatura

La temperatura es una magnitud que se puede relacionar con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia, mientras más rápido se muevan o oscilen dichas partículas mayor será su temperatura. Para medir la temperatura se utiliza un termómetro. En la figura 5.4 se muestra la temperatura medida en grados centígrados del 4 al 5 de agosto de 2014. Se puede observar que alcanza un punto máximo durante el día cercano a los 12 °C y disminuye durante la noche hasta 5 °C, estas temperaturas son las más comunes durante la mayor parte del año en el Observatorio HAWC.

### Presión atmosférica

La presión atmosférica depende principalmente de la altitud, mientras más alto nos encontremos con respecto al nivel del mar la presión que ejerce el aire sobre nosotros es menor. Para su medición se utiliza un barómetro y se mide en milibares. En la figura 5.4 en el segundo panel de arriba hacia abajo se muestran los valores de la presión atmosférica registrada del 4 al 5 de agosto de 2014, el promedio de la presión es esos dos días es de 628 mbar y a diferencia de la temperatura presenta dos máximos y dos mínimos durante el día y la noche.

### Humedad Relativa

La humedad relativa es una medida de la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. La humedad relativa se puede definir como la relación de la densidad del vapor de agua (masa por unidad de volumen) a la densidad de la saturación del vapor de agua expresada en porcentaje. La humedad relativa se mide con un instrumento llamado psicrómetro.

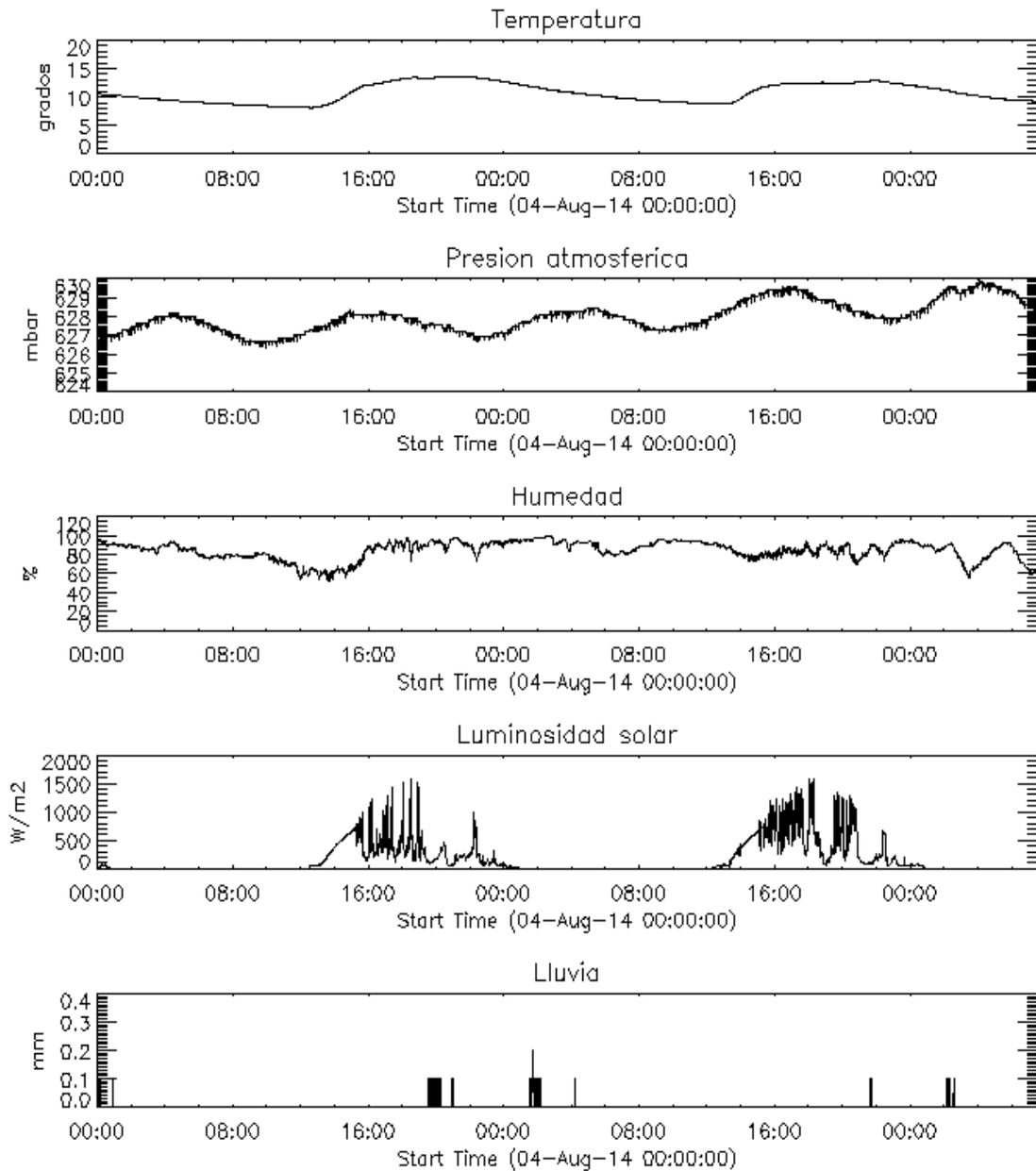


Figura 5.4: *Serie de tiempo de las variables atmosféricas en UT para el periodo del 4 al 5 de agosto de 2014.*

### Radiación solar

La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como radiación solar. La cantidad de radiación solar recibida en un punto de la Tierra se mide por

medio de un aparato llamado piranómetro y está dada en  $W/m^2$ . De la figura 5.4 observamos que durante la mañana cuando el Sol es visible alrededor de las 6:00 am tiempo local, la radiación solar va en incremento, pero después de las 9:00 se observan variaciones en los valores de la radiación, lo cual indica la presencia de nubes que impiden el paso de radiación solar al detector. Estos datos permiten saber en que momento se encuentran nubes sobre el observatorio durante las horas de día.

### **Precipitación**

El instrumento que se utiliza para medir la precipitación en un lugar y tiempo determinado se denomina pluviómetro. Este aparato está formado por un recipiente graduado donde se acumula el total de la lluvia que cae. El volumen de la lluvia recolectada se mide milímetros (mm). En la figura 5.4 observamos la cantidad de lluvia registrada cada minuto entre el 4 y 5 de agosto de 2014.

# CAPITULO 6

---

## Resultados

---

### 6.1 Búsqueda de incrementos.

Como se menciona anteriormente, el Observatorio HAWC ha registrado incrementos en el número de cuentas de los TDC Scalers, el objetivo de este trabajo es encontrar o sugerir una posible explicación de qué es lo que está causando dichos incrementos, para lo cual se utilizaron las bases de datos descritas en el capítulo anterior. Comencemos dando una definición de lo que llamamos incremento: *Un incremento es un aumento en el número de cuentas en los TDC Scalers a partir de un valor medio con un porcentaje de variación mayor a 1% el cual llega a tener una duración del orden de minutos.*

Se analizaron los datos de los TDC Scalers de HAWC para identificar los posibles incrementos en un periodo comprendido entre marzo de 2014 a octubre de 2015. Solo se tomaron como incrementos los eventos que fueron registrados por las tres multiplicidades. Se identificó a los incrementos de acuerdo a su fecha de registro por ejemplo el incremento registrado el 8 de noviembre de 2014 es el evento 110814.

En la figura 6.1 se muestra el promedio del número de cuentas/min obtenidas

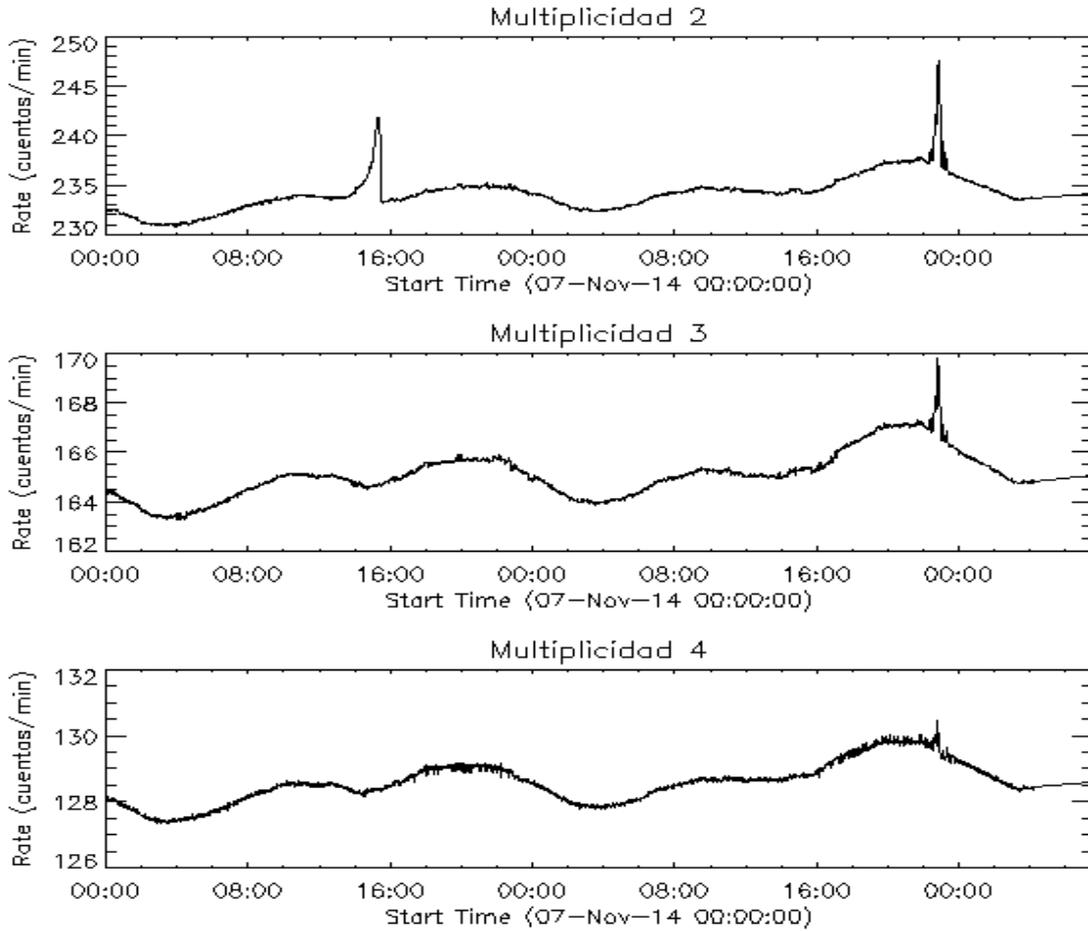


Figura 6.1: *El incremento 110814 registrado por las 3 multiplicidades.*

por HAWC del 7 al 8 de noviembre de 2014 en cada una de las tres multiplicidades. En el panel superior se tiene el número de cuentas/min en multiplicidad 2 en donde se observan dos incrementos: el primero inicia cerca de las 14:00 UT y el segundo a las 22:30 UT. Pero observamos que en las multiplicidades 3 y 4 solo se registró el incremento de las 22:30 UT, lo que nos sugiere que el primer incremento puede tratarse de alguna falla en el sistema de adquisición de datos y por lo tanto no es tomado en cuenta ya que de acuerdo a su duración y altura de ser real tendría que ser visto en las otras multiplicidades.

De marzo de 2014 a octubre de 2015 se encontraron un total de 27 incrementos, registrados por las tres multiplicidades, a cada incremento se le calculó el porcentaje

del aumento y se midió el tiempo de duración. El incremento 110814, que es el evento que se muestra en la figura 6.1, presenta un incremento de 4.20% y una duración de 30 minutos. En la tabla 6.1 se presentan los datos obtenidos para cada uno de los incrementos.

## 6.2 Incrementos vs tormentas eléctricas

La primera hipótesis que se sugirió fue que los incrementos podrían ser causados por relámpagos cercanos a HAWC, para comprobar esto se utilizaron los datos de la WWLLN para obtener la posición y el tiempo de los relámpagos cercanos en un radio de 30 km de distancia al centro de HAWC en los días donde se registraron incrementos.

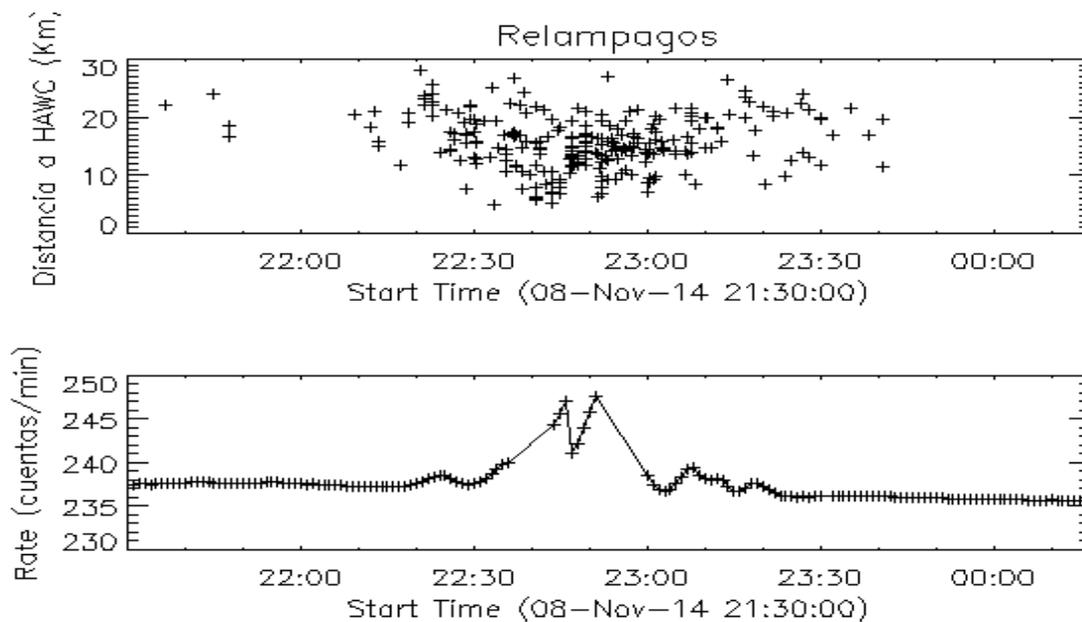


Figura 6.2: *El panel superior muestra los relámpagos cercanos HAWC y el panel inferior el número de cuentas por minuto para el día 8 de noviembre de 2014.*

En la figura 6.2 se muestran en el panel superior los relámpagos cercanos a HAWC de las 21:30 a las 24:00 UT del 8 de noviembre de 2014 cada cruz representa la distancia de un relámpago a tierra. Se observa una tormenta eléctrica por la cantidad de relámpagos a tierra registrados por la WWLLN. En el panel inferior

el incremento 110814 en ese mismo intervalo de tiempo. La tormenta eléctrica dio inicio a las 22:10 UT y termino a las 23:45 UT en total se registraron 265 descargas eléctricas a tierra en un radio de 30 km, la más cercana a una distancia de 4.88 Km de HAWC mientras que el incremento en las cuentas comenzo a las 22:30 y terminó aproximadamente a las 23:00 UT. Se buscó alguna correlación entre relámpagos cercanos a HAWC la cual pudiera estar asociada al incremento pero no se encontró correlación alguna ya sea en distancia, tiempo o en la cantidad de relámpagos en este evento ni en ninguno de los 27 incrementos. Se encontró que no en todos los incrementos se presentaron relámpagos cercanos antes o durante el incremento. En la tabla 6.1 se muestran estos datos.

### 6.3 Incrementos vs variables atmosféricas

La segunda hipótesis sugerida fue que los incrementos podrían ser causados por variaciones en la presión atmosférica, ya que la presión tiene una influencia sobre el número de cuentas detectadas por HAWC, en donde a medida que disminuye la presión se observa un efecto inverso sobre el número de cuentas registradas como puede observarse en los dos primeros paneles de la figura 6.3.

En el panel superior se muestra la presión atmosférica en HAWC registrada por el barómetro de las 19:00 UT del 7 de noviembre a las 02:00 UT del 9 de noviembre de 2014. En el panel central se muestra el promedio del número de cuentas por minuto de los detectores en multiplicidad 2 en el mismo intervalo de tiempo, donde se observa el incremento 110814 a las 22:00 UT del 8 de noviembre de 2014. Y en el panel inferior se muestra el número de cuentas por minuto corregidas por la presión atmosférica en donde se tiene que el incremento sigue estando presente, por lo que se descartó que la presión atmosférica sea la causante de los incrementos. En ninguno de los 27 incrementos registrados se encontro correlación alguna.

Una vez descartado que los incrementos fueran causados por variaciones en la presión atmosférica, se analizaron otros datos de la estación meteorológica como la humedad relativa, radiación solar y precipitación. En figura 6.4 se muestra datos de la estación meteorologica del 8 de noviembre de 2014 y el incremento 110814. En el primer panel se muestra el incremento 110814 de las 12:00 UT del 8 de noviembre

### 6.3. INCREMENTOS VS VARIABLES ATMOSFÉRICAS

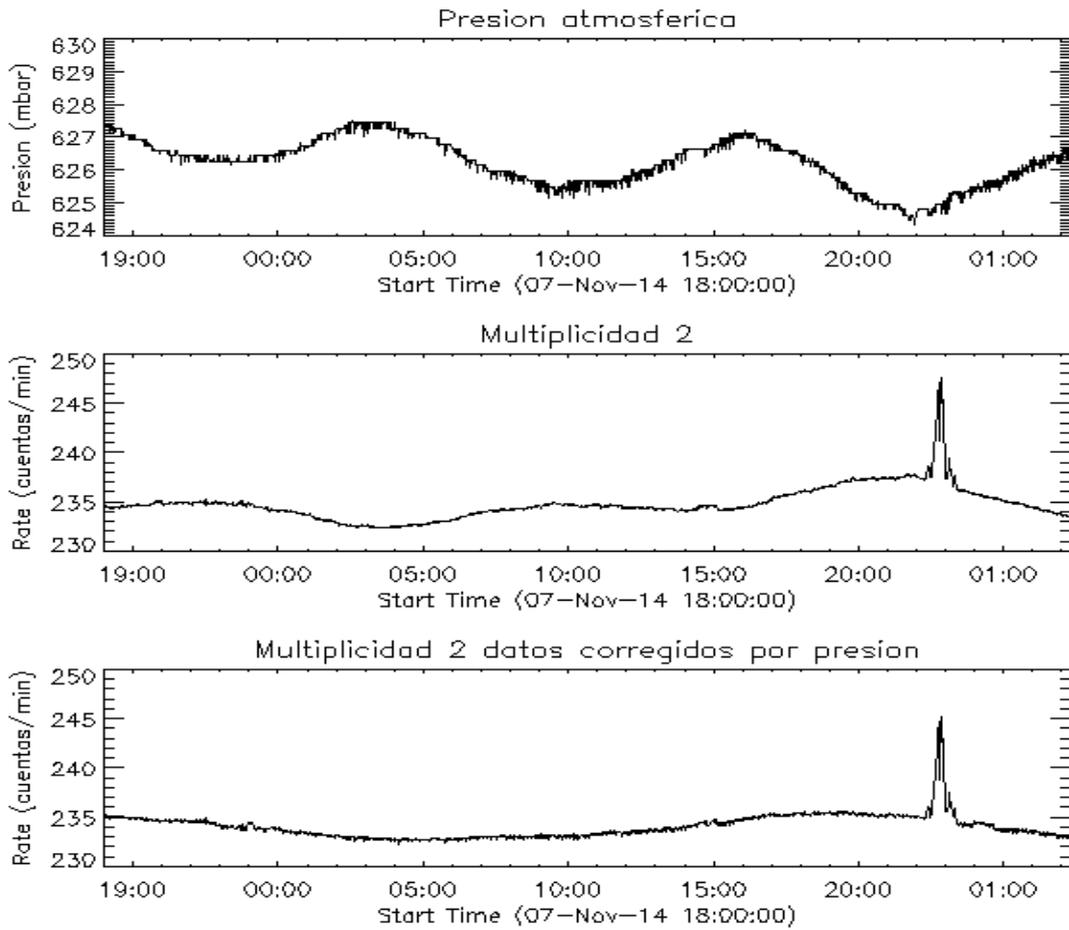


Figura 6.3: *Serie de tiempo de la presión atmosférica medida en HAWC (panel superior), número de cuentas por minuto sin corrección (panel central) y número de cuentas corregidas por presión (panel inferior).*

a las 02:00 UT del 9 de noviembre de 2014. En el segundo panel se tienen los datos obtenidos por el psicrómetro en donde se tiene que la humedad relativa durante ese intervalo de tiempo tiene dos máximos el primero cerca de las 12:00 UT ya que la humedad relativa es máxima justo antes de que salga el Sol y su segundo máximo se da al atardecer llegando hasta un 95% durante el incremento a las 22:30 UT. El siguiente panel muestra el registro de la radiación solar, ese día la salida del Sol fue a las 12:33 UT y la puesta a las 23:53 UT, de los datos podemos observar variaciones en la intensidad después de las 18:00 UT y cerca de las 22:30 UT el piranómetro marcó 0 W/m lo que nos indica la presencia de nubes al momento del incremento.

Finalmente en el panel inferior se muestra los datos de precipitación en donde se observa que durante el incremento comenzó a llover.

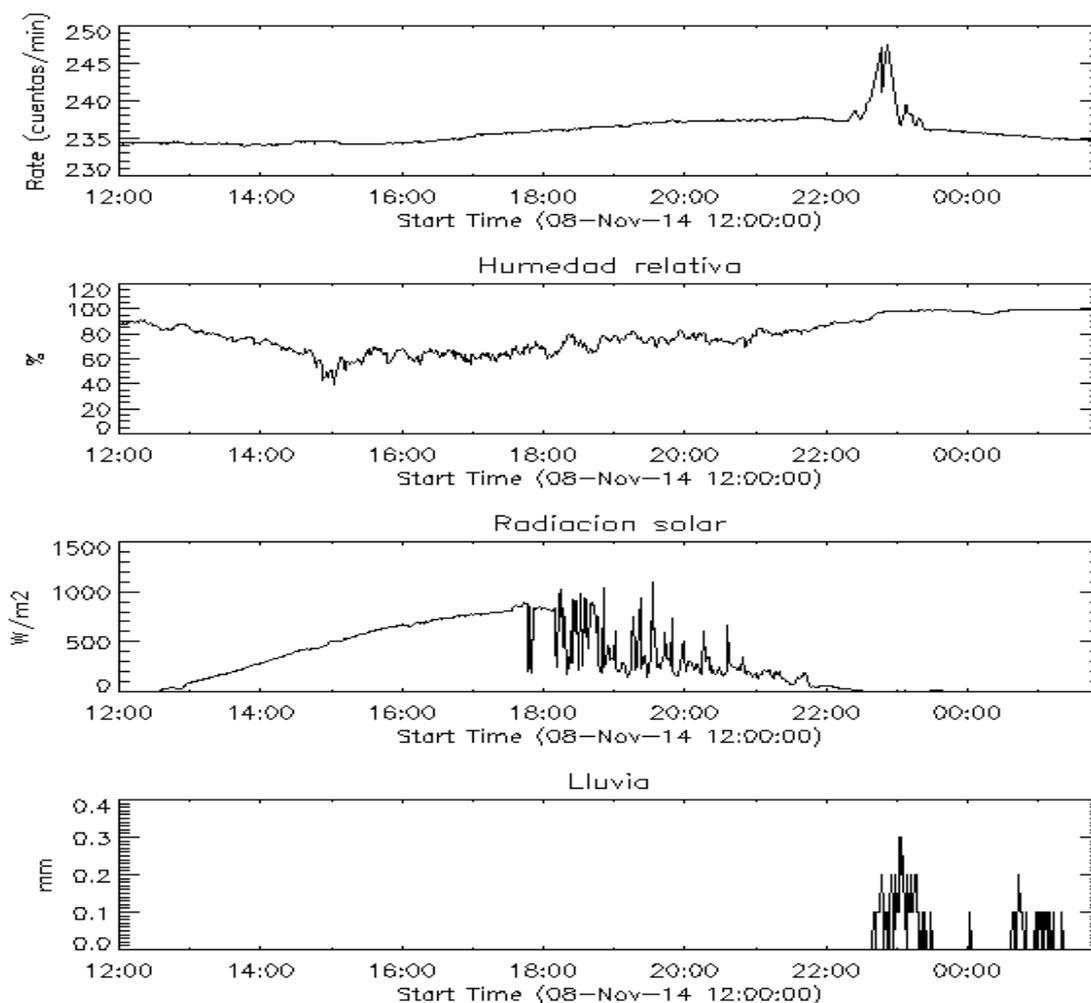


Figura 6.4: *Serie de tiempo de el número de cuentas por minuto (primer panel), humedad relativa (segundo panel), radiación solar (tercer panel) y cantidad de lluvia (cuarto panel).*

Los resultados de este análisis nos dicen que durante los 27 incrementos se registró lluvia en HAWC y una humedad relativa mayor al 80% lo que nos indica que al momento de los incrementos se encontraban nubes por encima del observatorio. En la tabla 6.1 se pueden observar los datos obtenidos para los 27 incrementos.

## 6.4 Tabla de datos

En la tabla 6.1 se presentan los datos obtenidos para los 27 incrementos, en las columnas de izquierda a derecha se muestra la fecha del incremento, la hora de inicio y final en tiempo universal (UT), la duración del incremento en minutos (min), el porcentaje del incremento (%), la humedad relativa durante el incremento (%), la cantidad de lluvia registrada durante el incremento (mm), el número de relámpagos registrados durante el incremento y si había nubes en ese momento de acuerdo a los datos de radiación solar.

Fecha	Hora UT	min	Incr %	Hum %	Lluvia mm	rayos	nubes
030914	22:33 - 22:50	17	5.3	90	0.1	12	si
042514a	01:00 - 01:16	16	1.95	95	0.5	0	no
042514b	01:45 - 01:58	13	1.89	94	0.5	0	no
050414	21:40 - 22:07	27	4.31	96	0.9	2	si
052714	20:09 - 20:33	24	4.62	86	0.9	1	si
070814	04:51 - 05:12	21	1.27	95	0.1	0	no
071814	18:52 - 19:08	16	1.78	88	0.8	0	si
080314	20:06 - 20:21	15	1.11	96	1.0	0	si
080514	01:29 - 02:00	31	1	95	1.4	0	no
081314	23:02 - 23:35	33	4.35	96	1.2	1	si
082114	09:10 - 09:24	14	1.68	94	0.6	0	no
100314a	03:50 - 04:35	45	2.95	96	0.2	0	no
100314b	19:35 - 20:06	31	5.4	93	0.6	1	si
100614	23:50 - 00:01	11	1.6	97	1.6	2	no
101314	22:22 - 22:35	13	1.67	85	0.6	0	si
110814	22:15 - 23:05	50	4.20	97	1.2	47	si
032715	19:50 - 20:18	28	4.70	94	0.1	0	si
052615	17:45 - 18:13	30	6.33	92	0.5	0	si
053015	21:04 - 21:27	23	1.68	91	0.1	0	si
061415	22:12 - 22:35	23	5.08	97	1.8	0	si
062015	23:28 - 23:50	22	1.79	93	1.0	0	si
071015	00:01 - 00:19	18	4.68	94	0.2	0	si
071415	20:06 - 20:20	-	3.28	95	0.7	0	si
090315	17:59 - 18:23	24	1.04	96	0.2	0	si
091815	01:00 - 01:35	35	4.32	94	1.4	0	no
102815a	01:18 - 01:38	20	5.53	92	0.2	12	no
102815b	20:21 - 20:54	33	3.84	91	0.1	34	si

Tabla 6.1: *Tabla de los incrementos registrados entre marzo de 2014 y octubre de 2015.*

De los datos se obtuvo que durante todos los incrementos se registró lluvia y un aumento en la humedad relativa mayor al 85%, el incremento más grande fue el 052615 con un porcentaje de incremento de 6.33% una duración de 31 minutos, humedad relativa del 83%, 0.1 mm de lluvia y no se registraron relámpagos. El más pequeño tiene un valor del 1% y fue el 080514 con una duración de 31 minutos, un porcentaje de humedad relativa de 95% y 1.4 mm de lluvia.

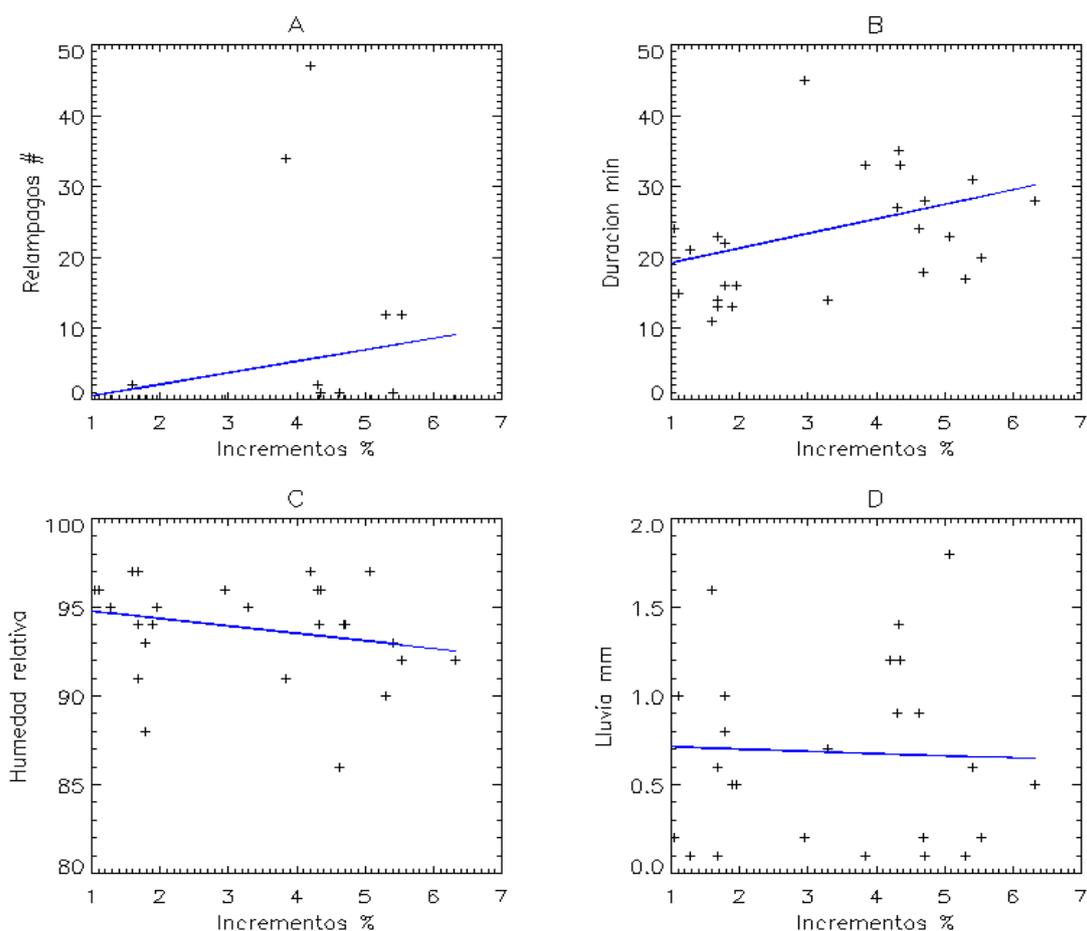


Figura 6.5: El panel A tiene una correlación del 0.25, el B de 0.35, el C de -0.25 y el D de -0.04

Buscando una relación entre los datos obtenidos y los incrementos se graficaron los datos de la tabla 7.1. En la figura 6.5 se muestran las graficas. En el panel A se tiene el número de relámpagos vs el porcentaje del incremento, en el panel B se tiene

la duración en minutos del incremento vs el porcentaje del incremento, en el panel C la humedad relativa vs el porcentaje del incremento y en el panel D la cantidad de lluvia en mm durante el incremento vs el porcentaje del incremento. En los cuatro paneles se realizó un ajuste lineal y se calculó la correlación encontrando para el panel A una correlación = 0.25, para el panel B una correlación=0.35, para el C una correlación= -0.25 y para el D una correlación= -0.04. Por lo que se descarta que el porcentaje del incremento este directamente relacionado con la humedad relativa, con la cantidad de lluvia y con las descargas electricas a tierra.

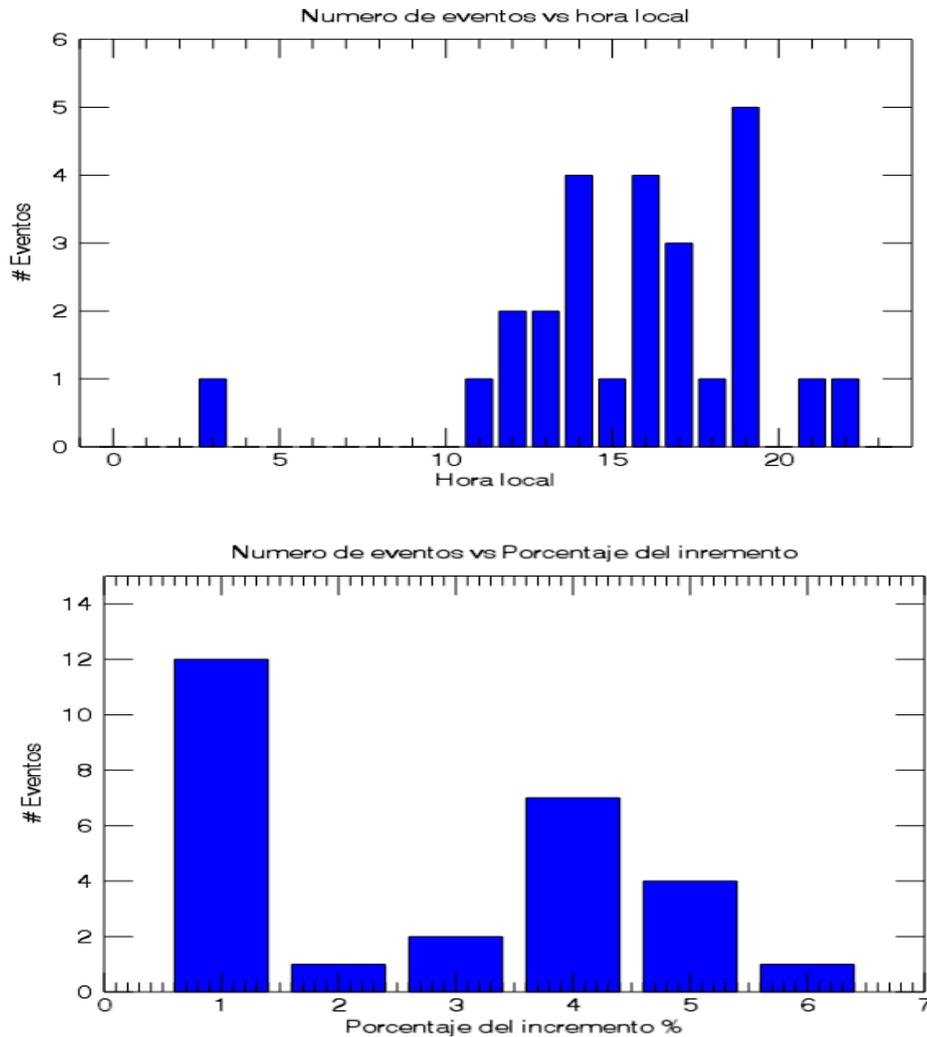


Figura 6.6: *Número de incrementos de acuerdo a la hora en hora local (panel superior) y número de incrementos de acuerdo a su porcentaje (panel inferior).*

En la figura 6.6 se muestra en el panel superior el número de eventos en el eje "Y" y la hora a la que se registraron dichos eventos en el eje "X" en hora local. Donde se obtiene que el 90% de los incrementos se produjo entre las 12 y las 19 horas teniendo un pico máximo de 5 incrementos a las 19:00 horas. Mientras que en el panel inferior se muestra el número de eventos vs el porcentaje de incrementos en donde se puede observar que 12 eventos registraron un incremento del 1% y solo 7 el 4%.

## 6.5 Incrementos vs campo eléctrico.

Analizando los datos del EFM-100 en las fechas y hora de los incrementos se encontraron variaciones en la intensidad de campo eléctrico, pero solo se tienen datos del EFM-100 a partir de mayo de 2015 con lo que solo se pudieron analizar los últimos incrementos del 2015, para los incrementos 053015 y 061415 no se tienen datos. A continuación se muestran estas variaciones las cuales coinciden en el tiempo con los incrementos. Se encontraron dos casos para los incrementos: El primero es cuando no se registran relámpagos a tierra antes ni después del incremento, lo que nos dice que solamente se presentó una variación en el campo eléctrico sin descargas a tierra. Y el segundo caso es cuando se registran descargas a tierra minutos antes, durante y después del incremento.

### 6.5.1 Caso 1 (Sin descargas a tierra)

#### 052615

En la figura 6.7 se muestra el campo eléctrico y los datos de los TDC Scalers de HAWC para el incremento 052615. La línea continua (negro) representa el campo eléctrico en kV/m y las cruces (azul) el número de cuentas/min. Se observa que antes y después del incremento el promedio de los TDC Scalers se mantiene constante, al igual que el campo eléctrico. A simple vista se puede observar una correlación entre el incremento y la variación negativa del campo eléctrico.

El inicio del incremento se registró a las 17:45 alcanzando un primer pico máximo a las 17:56 UT y el segundo a las 18:07 UT para regresar a su valor promedio a las 18:15 UT teniendo una duración de 30 minutos. De los datos de campo

## 6.5. INCREMENTOS VS CAMPO ELÉCTRICO.

eléctrico se puede observar que presenta una forma muy similar al incremento pero en sentido opuesto, a las 17:52 alcanza un pico positivo para después disminuir hasta  $-60\text{kV/m}$  a las 18:02, mientras que el segundo pico negativo se registra a las 18:09 UT posteriormente vuelve a aumentar hasta llegar a un pico positivo y regresar a su valor de campo de buen tiempo. La duración de la disminución del campo es de aproximadamente 30 minutos que es lo que dura el incremento, la diferencia de tiempo entre los picos TDC Scaler es de 11 minutos mientras que la diferencia de tiempo entre los mínimos del campo eléctrico es de 8 minutos.

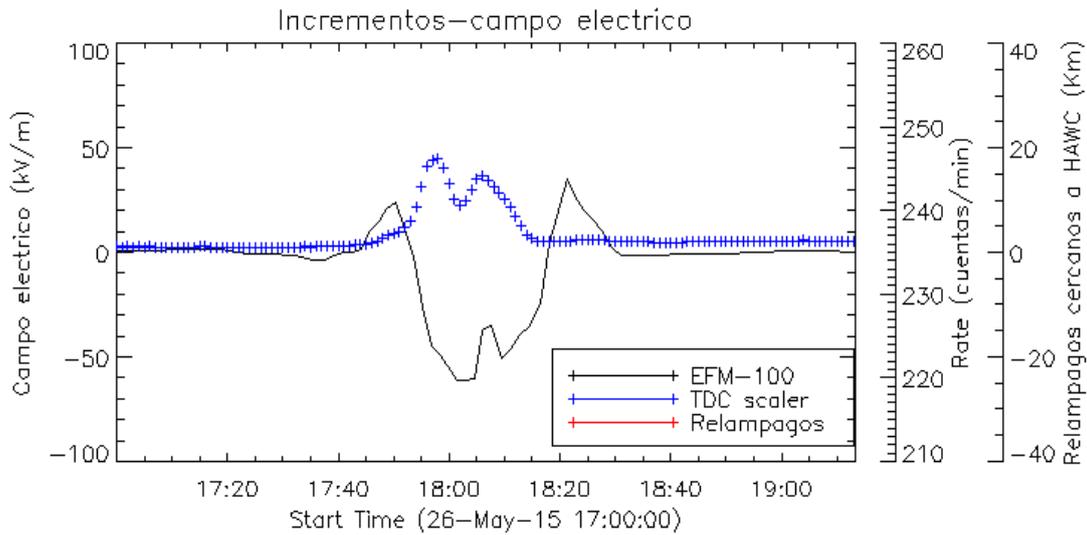
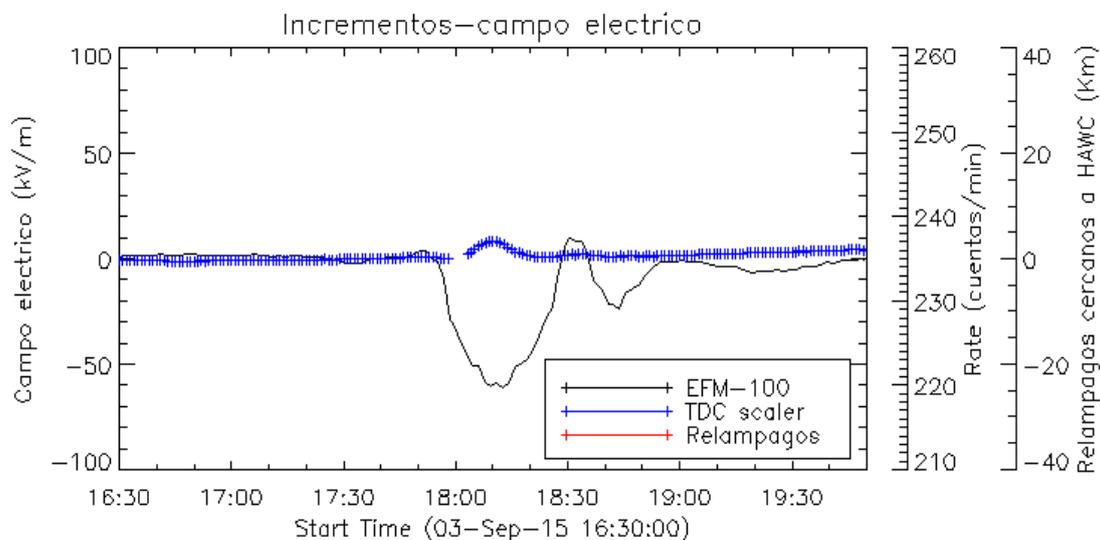


Figura 6.7: Incremento 052615 y campo eléctrico

### 090315

En la figura 6.8 se muestra el campo eléctrico y los datos de los TDC Scalers para el incremento 090315. De igual forma que en el incremento 052615 se observa que antes y después del incremento el campo eléctrico y el número de cuentas por minuto se mantienen constantes y no se registran relámpagos a tierra. El incremento inicia a las 17:59 UT y termina a las 18:23 UT teniendo su máximo a las 18:10 UT y una duración de 24 minutos. En los datos del campo eléctrico se observa que este tiene un pequeño aumento para después disminuir alcanzando su mínimo a las 18:11 UT en  $-59\text{kV/m}$  el cual se da un minuto después del máximo del incremento, la duración de la disminución del campo eléctrico es de 35 minutos. Posteriormente aumenta a

Figura 6.8: *Incremento 090315*

9 kV/m y a las 18:35 UT vuelve a disminuir hasta -24 kV/m, pero esta disminución no se ve reflejada en las cuentas aparentemente por ser muy pequeña, más adelante se muestra que solo los valores del campo eléctrico menores a -50 kV/m son los que se reflejan en los TDC Scalers.

## 6.5.2 Caso 2 (Con descargas a tierra)

### 091815

El caso 2 es cuando se registran relámpagos a tierra como se puede observar en la figura 6.9 en donde la línea continua en color negro representa el campo eléctrico en kV/m, las cruces de color azul el número de cuentas/minuto de los TDC Scalers y las cruces en rojo los relámpagos a tierra cercanos a HAWC en un radio de 40 km. Se muestra el incremento 091815 el cual tiene su pico máximo a las 01:15 UT mientras que observamos que el campo eléctrico tiene variaciones desde las 20:00 UT del 17 de septiembre presentando picos en la intensidad negativa a las 23:32, 23:45, 00:13, 00:42, 00:49 UT las cuales son debidas a la tormenta eléctrica. A la 1:08 presenta un pico positivo en 30 kV/m para disminuir repentinamente hasta llegar a la saturación del detector en -60 kV/m por un intervalo de 25 minutos para aumentar positivamente a 45 kV/m y después volver a su valor de campo de buen

tiempo. Como se observa en el campo eléctrico se da una saturación en  $-60$  kV/m 3 minutos después del pico del incremento por lo que se cree que fue la que causo el incremento.

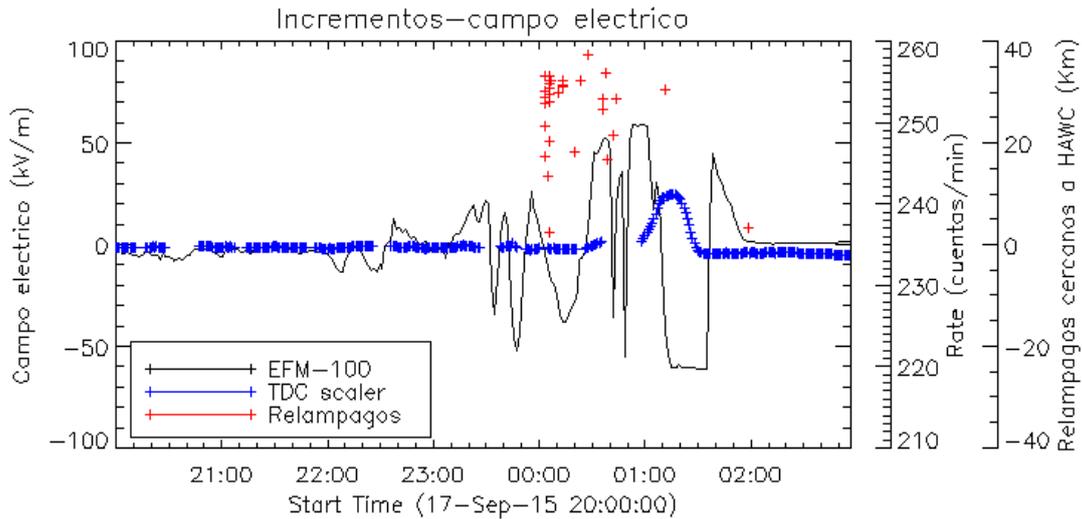


Figura 6.9: *Incremento 091815*

### 102815a y 102815b

El 28 de octubre de 2015 se registraron 2 incrementos el primero es el 102815a el cual estuvo acompañado de tormenta eléctrica y dio inicio a las 00:47 UT terminando a las 00:57 UT teniendo el máximo en las cuentas/min a las 00:53, como se puede apreciar en la figura 6.10 mientras que el campo comenzó a tener variaciones negativas desde las 00:13 UT alcanzando la saturación del negativo en  $-60$  kV/m a las 00:56 por un intervalo de 9 minutos. La diferencia de tiempo entre el máximo del incremento y la saturación del campo eléctrico es de 3 minutos.

El otro incremento que se registro el 28 de octubre fue el 102815b el cual también estuvo acompañado de una fuerte tormenta eléctrica como se observa en la figura 6.11. En la que se registran dos picos en el numero de cuentas/min a las 19:04 y a las 19:45 UT.

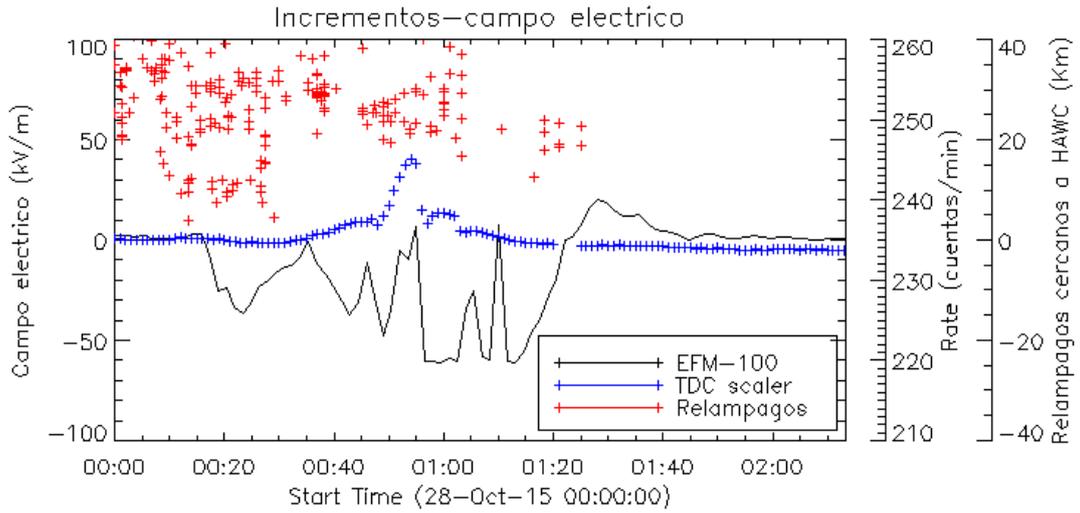


Figura 6.10: *Incremento 102815a*

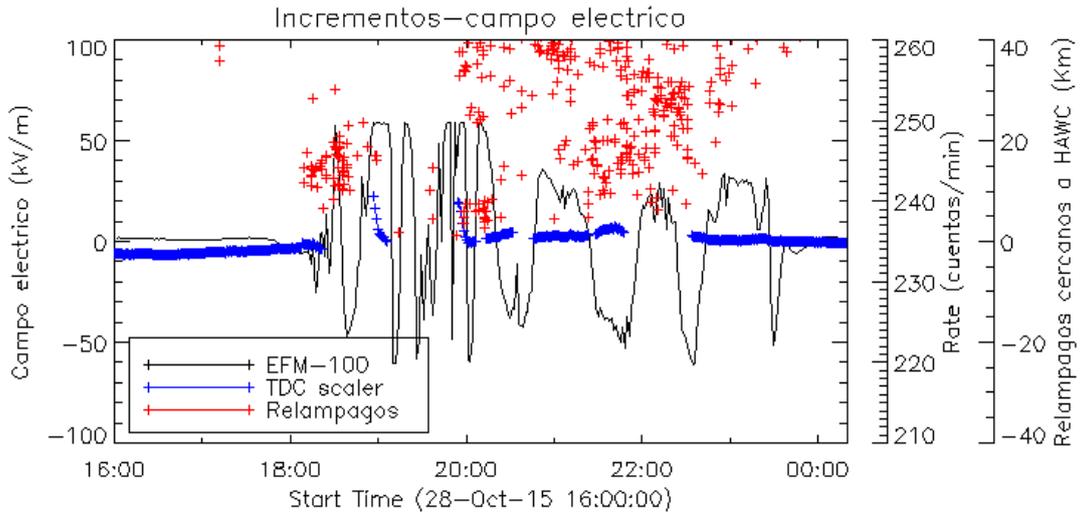


Figura 6.11: *Incremento 102815b*

### 6.5.3 Correlacion entre el campo eléctrico y los incrementos

De los datos de los incrementos del caso 2 es muy difícil establecer una correlación entre el campo eléctrico y los TDC Scalers ya que cuando se presentan descargas electricas generalmente se detiene el conteo en los TDC Scalers y porque el campo eléctrico tiende a saturarse en  $-60$  kV/m. Se realizó un ajuste lineal por mínimos

## 6.5. INCREMENTOS VS CAMPO ELÉCTRICO.

cuadrados y se cálculo la correlación dato a dato. Este análisis solo se pudo hacer para los incrementos del caso 1: 260515 y 090315 que son los que no presentan muchas variaciones en la intensidad del campo y tampoco tormentas eléctricas antes o después del incremento.

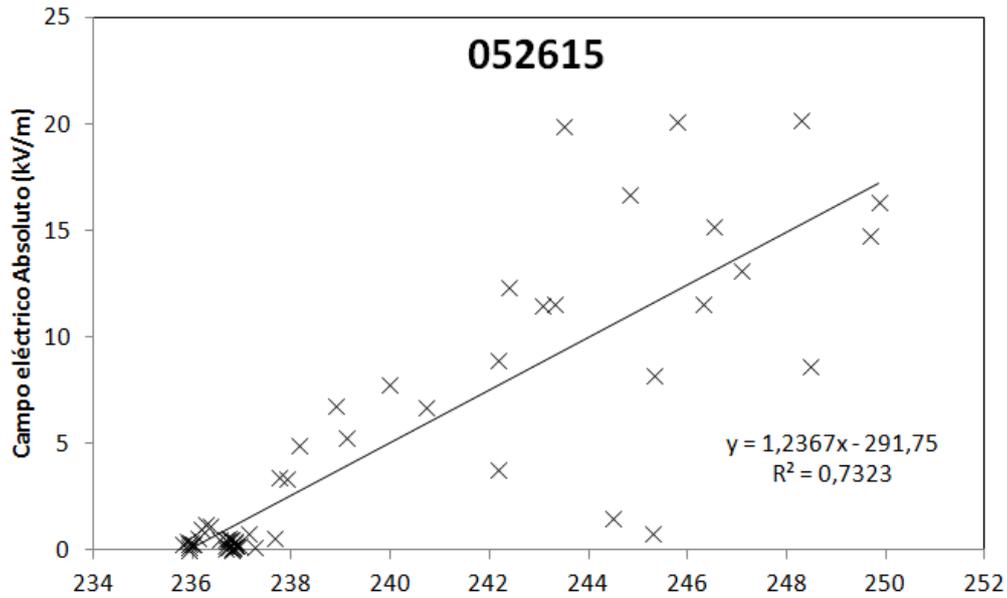


Figura 6.12: Correlación entre campo eléctrico y número de cuentas/min para el incremento 052615.

En la figura 6.12 se muestra el incremento 052615. El eje "Y" se encuentra el valor absoluto del campo eléctrico en kV/m mientras que en el eje "X" el número de cuentas/minuto. Se realizó un ajuste lineal resultando una pendiente de 1.23657 y una ordenada al origen de 291.75, con una R cuadrada de 0.7323. La correlación entre los datos es 0.8557 lo cual nos dice que es una correlación alta. Para el evento 090315 el cual se muestra en la figura 6.13 el ajuste lineal nos indica una pendiente de 7.27 y una ordenada al origen de -1706.8 con una R cuadrada de 0.8741 y una correlación muy alta de 0.9349.

En estos dos eventos se tiene una buena correlación entre el campo eléctrico y los incrementos en el número de cuentas por minuto de los TDC Scalers. Lamentablemente todavía no se puede decir mucho sobre que los incrementos son

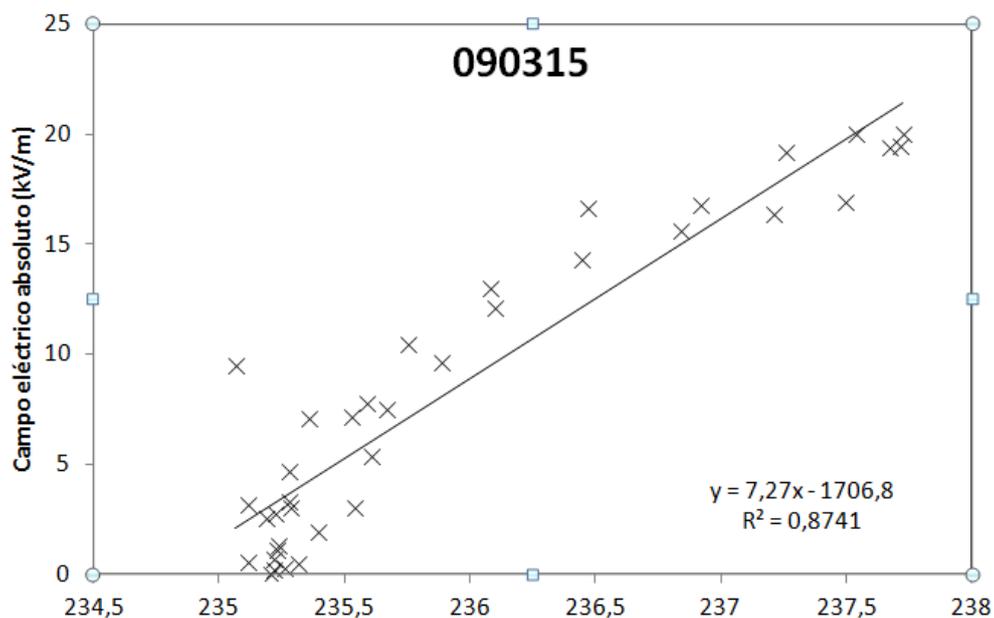


Figura 6.13: *Correlación entre campo eléctrico y número de cuentas/min para el incremento 090315.*

causados por las variaciones en el campo eléctrico ya estadísticamente falta analizar más eventos para poder dar una conclusión, pero de los datos se puede decir que es una posible causa.

# CAPITULO 7

---

## Discusión y conclusiones

---

### 7.1 Discusión

De acuerdo a los resultados se obtuvo que los incrementos no son causados directamente por los relámpagos a tierra ya que los incrementos se producen sin la presencia de relámpagos. Pero se puede decir que están asociados a disminuciones en el campo eléctrico asociadas a la presencia de nubes de tormenta ya que de acuerdo a los datos de campo eléctrico se observa una relación en los cambios en la intensidad del campo eléctrico y el aumento en el número de cuentas. Esto nos lleva a pensar en lo propuesto por Wilson de que fuertes campos eléctricos generados dentro de una nube de tormenta pueden acelerar electrones a energías muy grandes.

Tsuchida (2012) dice que se requieren campos eléctricos del orden de 240 kV/m para que electrones secundarios de 1-10 MeV de energía puedan ser acelerados a 40 MeV dentro de una nube de tormenta tomando en cuenta pérdidas de energía por ionización. En nuestro caso las mediciones que se tienen del campo eléctrico son entre la base de la nube y el detector de campo eléctrico en la superficie. Los campos eléctricos medidos antes de la saturación del detector de campo EFM-100 son del orden de -60 kV/m y la energía necesaria para que un electrón entre al detector y produzca radiación Cherenkov en el agua es aproximadamente de 10 MeV. Se tienen

que tomar en cuenta varios parametros como la distancia a la que se encuentra la nube sobre el detector de campo eléctrico ya que esta puede variar entre 0 y 500 metros aproximadamente o la forma de la nube ya que cada nube es completamente diferente.

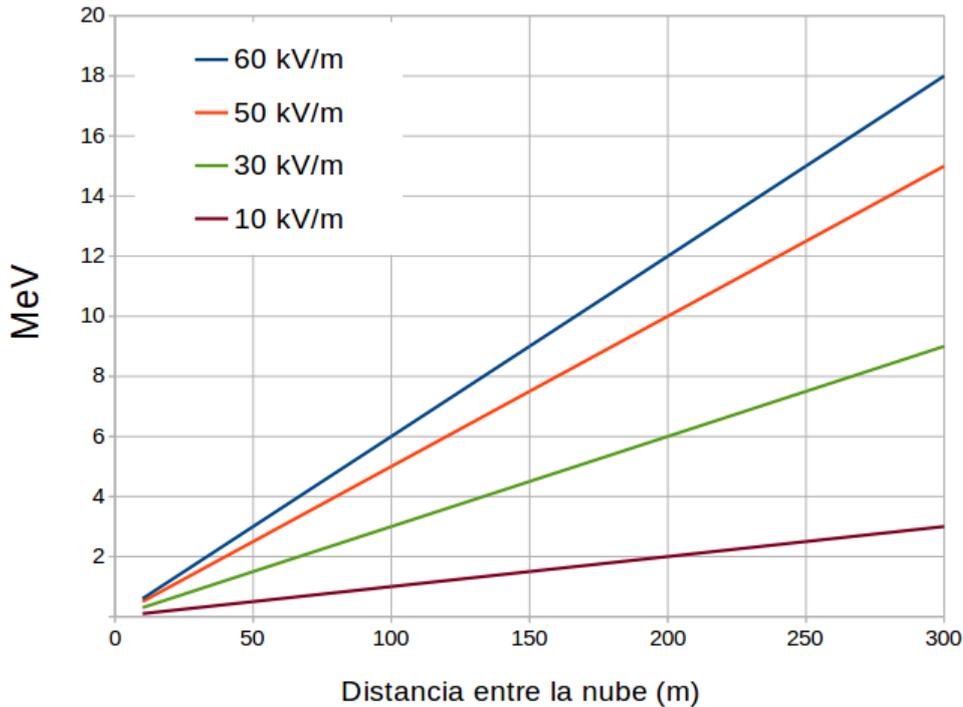


Figura 7.1: Energías que adquiere un electrón en un campo eléctrico a distintas distancias entre la nube y el detector.

Si multiplicamos la intensidad del campo eléctrico por la distancia a la que se puede encontrar la nube sobre el detector podemos obtener la energía que obtendría un electrón acelerado en esa diferencia de potencial. En la figura 7.1 se muestra la gráfica de la energía que adquiere un electrón en un campo eléctrico a distintas distancias entre la nube y la superficie. Por la cercanía a la que se encuentran las nubes de HAWC se tomo como una altura máxima 300 metros. Se puede decir que se requieren campos eléctricos menores a  $-50$  kV/m para que una nube situada a 200 metros de altura pueda acelerar partículas a 10 MeV sin contar efectos de colisiones en el aire. Lo que coincide con las mediciones obtenidas ya los incrementos se presentan con campos eléctricos menores a  $-50$  kV/m, un campo mayor a  $-50$  kV/m no presenta efecto alguno en el número de cuentas/minuto de los TDC Scalers

como se puede observar en las figuras 6.8-6.11 ya que su energía tiende a ser menor a 10 Mev.

Gurevich (1992) propuso un modelo de multiplicación de electrones llamado Runaway Breakdown conocido hoy en día como RREA Avalancha Descontrolada de Electrones Relativistas. El cual sugiere que los electrones secundarios producidos por las cascadas atmosféricas pueden ser acelerados por los campos eléctricos de las nubes de tormenta para provocar aumentos de electrones en forma descontrolada dando lugar a grandes cantidades de electrones y a rayos gamma, así como rayos X y neutrones. Dependiendo de la dirección del campo eléctrico los electrones pueden ser acelerados o desacelerados. Por lo que se puede decir que los incrementos son aumentos en el flujo de partículas generadas en presencia de nubes de tormenta.

## 7.2 Conclusiones

En total se encontraron y analizaron 27 incrementos en el número de cuentas del observatorio HAWC entre los meses de marzo de 2014 a octubre de 2015. Se midieron incrementos de 1% hasta 6% por encima del promedio del número de cuentas. Se descarto que fueran causados por descargas eléctricas a tierra y por variaciones en la presión atmosférica. Ya que solo en 11 eventos se registraron relámpagos durante los incrementos y no se encontró correlación alguna. En todos los incrementos se registró una humedad mayor al 80% y en todos los eventos se presentó lluvia lo cual es un indicador de la presencia de nubes de tormenta sobre el observatorio.

Se observa una correlación entre los incrementos en el número de cuentas y disminuciones en la intensidad del campo eléctrico mayores a -50 kV/m. Todavía no se sabe con exactitud que tipo de partículas son las que estan llegando a los detectores pero debido que el campo eléctrico es negativo podrian tratarse de electrones. Para que un PMT pueda registrar un pulso las partículas que lleguen al detector tiene que ser lo suficientemente energéticas para poder producir luz Cherenkov por lo que se requiere una energía mínima de 10 MeV. Se puede decir que los incrementos son un flujo de partículas con energías mayores a 10 MeVs generado en presencia de campo eléctrico de -50 kV/m en presencia de nubes de

tormenta.

### 7.3 Trabajo a futuro

Se requiere un análisis mucho mas avanzado para poder entender por completo este fenómeno por lo que se tiene propuesto para un futuro:

- Hacer simulaciones de la aceleración de partículas en campos eléctrico entre la base de la nube y el detector.
- Analizar los datos del sistema de adquisición secundario de HAWC.
- Determinar el tipo de partículas y su energía.
- Determinar la región de donde provienen dichas partículas en la nube.

**Porcentaje del incremento en cada detector.**

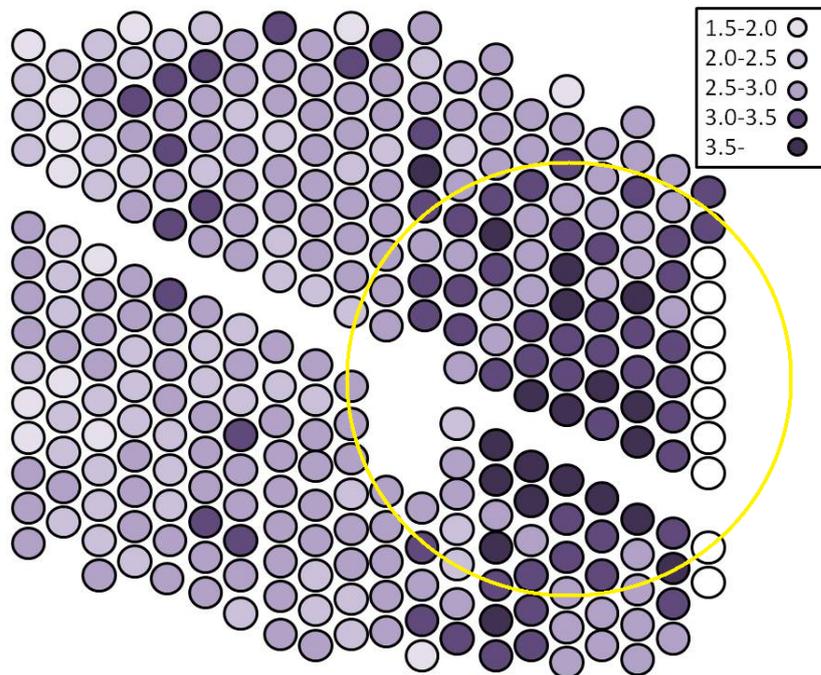


Figura 7.2: *Porcentaje del incremento en cada detector para el evento 102815a*

Aquí se presenta un caso en el que se obtuvo el porcentaje del incremento para cada detector ya que en el trabajo se utiliza el promedio de los 300 detectores encontrando que cada detector presentó valores diferentes. En la figura 7.2 se presenta el arreglo de los 300 detectores de HAWC para el evento 102815a en donde cada círculo representa la posición de un detector y los colores representan el porcentaje del incremento cada .5%. Los círculos en blanco son los detectores en los que no se tiene datos. Las tonalidades más oscuras representan el mayor porcentaje de incremento. Se puede observar del lado derecho del arreglo en la región encerrada por un círculo amarillo es en donde se tienen los detectores con mayor porcentaje de incremento, lo que nos podría estar indicando que en esta región es en donde se registró un mayor flujo de partículas. Se requiere automatizar el programa para poder determinar como varía en el tiempo el incremento en cada detector para cada evento.



---

## Bibliografía

---

- [1] Abeyssekara, A. U., et al. "On the sensitivity of the HAWC observatory to gamma-ray bursts." *Astroparticle Physics* 35.10 (2012): 641-650.
- [2] Chilingarian, A., Mailyan, B., and Vanyan, L. (2012). Recovering of the energy spectra of electrons and gamma rays coming from the thunderclouds. *Atmospheric research*, 114, 1-16.
- [3] Chilingarian, A., Chilingaryan, S., and Reymers, A. (2015). Atmospheric discharges and particle fluxes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(7), 5845-5853.
- [4] De la Fuente, Eduardo, et al. "The High Altitude Water Cherenkov (HAWC) TeV Gamma Ray Observatory." *Cosmic Rays in Star-Forming Environments*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 439-446
- [5] DeYoung, Tyce, and HAWC Collaboration. "The HAWC observatory." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 692 (2012): 72-76.
- [6] Dingus, Brenda L., and HAWC Collaboration. "HAWC (High Altitude Water Cherenkov) observatory for surveying the TeV sky." *The First GLAST Symposium*. Vol. 921. No. 1. AIP Publishing, 2007.
- [7] Dwyer, J. R., and Uman, M. A. (2014). The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4), 147-241.
- [8] Franklin, B. (1774). *Experiments and observations on electricity made at Philadelphia*. London E Cave.

- [9] Gish, O. H. (1944). Evaluation and interpretation of the columnar resistance of the atmosphere. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 49(3), 159-168.
- [10] Gurevich, A. V., Milikh, G. M., and Roussel-Dupre, R. (1992). Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165(5-6), 463-468.
- [11] Khaerdinov, N. S., Lidvansky, A. A., and Petkov, V. B. (2005). Cosmic rays and the electric field of thunderclouds: Evidence for acceleration of particles (runaway electrons). *Atmospheric Research*, 76(1), 346-354.
- [12] Lamb, D., and Verlinde, J. (2011). *Physics and chemistry of clouds*. Cambridge University Press.
- [13] Meese, A. D., and Evans, W. H. (1962). Charge transfer in the lightning stroke as determined by the magnetograph. *Journal of the Franklin Institute*, 273(5), 375-382.
- [14] Muraki, Y., Axford, W. I., Matsubara, Y., Masuda, K., Miyamoto, Y., Menjyou, H, and Shibata, S. (2004). Effects of atmospheric electric fields on cosmic rays. *Physical Review D*, 69(12), 123010.
- [15] Mostafá, Miguel A., and HAWC Collaboration. "The High-Altitude Water Cherenkov Observatory." *Brazilian Journal of Physics* 44.5 (2014): 571-580.
- [16] Rakov, V. A., and Uman, M. A. (2003). *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press.
- [17] Robinson, G. D. (1941, February). The distribution of electricity in thunderclouds, II. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 177, No. 970, pp. 281-329). The Royal Society.
- [18] Saunders, C. (2008). Charge separation mechanisms in clouds. In *Planetary Atmospheric Electricity* (pp. 335-353). Springer New York.
- [19] Schonland, B. F. J. (1930). Thunder-storms and the penetrating radiation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 130(812), 37-63.

- [20] Shaw, G. E. (1967). Background cosmic count increase associated with thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 72(18), 4623-4626.
- [21] Taboada, Ignacio, and Rudy C. Gilmore. "Prospects for the detection of GRBs with HAWC." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 742 (2014): 276-277.
- [22] Torii, T., Takeishi, M., and Hosono, T. (2002). Observation of gamma ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D17).
- [23] Tsuchiya, H., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T, and Makishima, K. (2007). Detection of high-energy gamma rays from winter thunderclouds. *Physical review letters*, 99(16), 165002.
- [24] Tsuchiya, H., Enoto, T., Torii, T., Nakazawa, K., Yuasa, T., Torii, S, and Takita, M. (2009). Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds. *Physical review letters*, 102(25), 255003.
- [25] Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., ... and Kondo, I. (2012). Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet. *Physical Review D*, 85(9), 092006.
- [26] Uman, M. A. (1969). *Lightning* McGraw-Hill. New York, 264.
- [27] Uman, M. A. "The lightning discharge." (1987).
- [28] Wang, P. K. (2013). *Physics and dynamics of clouds and precipitation*. Cambridge University Press.
- [29] Wahlin, L. (1986). *Atmospheric electrostatics*.
- [30] Wallace, J. M., and Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Academic press.
- [31] Weekes, Trevor C. "Very high energy gamma-ray astronomy." *Physics Reports* 160.1 (1988): 1-121.

- [32] Westerhoff, Stefan. "First Light with the HAWC Gamma-Ray Observatory." Proceedings of The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2013). id. 412. Vol. 1.
- [33] Wilson, C. T. R. (1924). The electric field of a thundercloud and some of its effects. Proceedings of the Physical Society of London, 37(1), 32D.
- [34] Wilson, C. T. R. (1929). Some thundercloud problems. Journal of the Franklin Institute, 208(1), 1-12.