



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE CIENCIAS EN FÍSICA Y MATEMÁTICAS

MEDICIONES DEL FLUJO DE RADIACIÓN
CÓSMICA CON EL DETECTOR ESCARAMUJO
EN CHIAPAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS FÍSICAS

PRESENTA:

VICTOR MANUEL LÓPEZ LUNA X140029

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. KAREN SALOMÉ CABALLERO MORA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. OSCAR GUSTAVO MORALES OLIVARES

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, diciembre de 2023.





Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
21 de Noviembre de 2023
Oficio No. FCFM/0492/23

Dra. Karen Salomé Caballero Mora
Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares
Director de Tesis
Co-Asesora de Tesis
Presente

Por este medio me permito informarle que una vez efectuada la revisión de la tesis denominada:

“MEDICIÓN DEL FLUJO DE RADIACIÓN CÓSMICA CON EL DETECTOR ESCARAMUJO EN CHIAPAS”.

Ha sido aceptado para sustentar el Examen de Grado de Maestría en Ciencias Físicas del Lic. Víctor Manuel López Luna con matrícula escolar X140029.

Se autoriza su impresión en virtud de cumplir con los requisitos correspondientes.

Atentamente
“Por la conciencia de la necesidad de servir”


Dr. Orlando Díaz Hernández
Director


DIRECCIÓN
FCFM

C. c. p. Dr. Florencio Corona Vázquez, Secretario Académico de la FCFM
Lic. Juan Manuel Aguiar Gámez, Encargado del Control Escolar Posgrado de la FCFM
Archivo
ODH/jmag



Código: FO-113-05-05
Revisión: 0


CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Victor Manuel López Luna,
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Mediciones de flujo de radiación cósmica con el detector Escaramujo en Chiapas".

_____,"
presentada y aprobada en el año 2023 como requisito para obtener el título o grado de Maestría en Ciencias físicas, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 27 días del mes de noviembre del año 2023.



Victor Manuel López Luna

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Dedicatoria

Para mi familia y en memoria de mi papá QEPD.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar a lograr esta meta y no haberla abandonado. A mi padre José que nunca me ha dejado solo en este camino, aunque ya no tengo la oportunidad de poder decirle que se ha culminado este proyecto y ya no esté conmigo para celebrar, sé que desde el más allá estará orgulloso, siempre será de ayuda e inspiración desde el más allá ¡gracias papá!

A mi madre Antonia que siempre ha sido un gran apoyo y a mis hermanos con quienes hemos pasado momentos muy difíciles, en los días más oscuros que hemos pasado, siempre hemos estado juntos y no nos hemos dejado caer, siempre estamos unidos cuando nos necesitamos, gracias mamá y a ustedes mis hermanos y hermanitas, y mi abuela.

Agradezco a Amairani por haberme brindado cariño y apoyo a lo largo de estos años.

A mis asesores, la Dra. Karen Salomé Caballero Mora, que me enseñó que uno nunca debe rendirse ante cualquier circunstancia y debe seguir adelante y nunca abandonar por lo que siempre hemos luchado, por su gran paciencia y la inmensa ayuda que me proporcionó durante la realización de la tesis, por sus grandes consejos, aportes, por estar dispuesta a las asesorías y su implacable dedicación, por todo el apoyo que me ha dado desde que la conozco, aprendí mucho de ella, muchísimas gracias, y una disculpa por haber casi tirado el trabajo y por haber abandonado por mucho tiempo. Al Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares por su valiosa ayuda y paciencia ante los errores que cometí a lo largo del desarrollo de este trabajo, y por sus aportaciones fundamentales para la culminación de este trabajo, ¡muchas gracias!

Agradezco a mis sinodales Dr. Roberto, Dr. Marco Antonio y al Dr. Luis Martín. Por el tiempo, dedicación y sus aportaciones para que este trabajo. En particular al Dr. Hugo de León que desde el principio nos ayudó con algunos problemas técnicos que se presentaron con la instrumentación y también en sus aportaciones para este trabajo.

Agradezco al CONAHCYT por haberme apoyado durante mis años de estudio en este posgrado, y por apoyar a los jóvenes para que puedan continuar su carrera científica.

wokol a w'alik

Ya kalbé wokol te kawaltik te la yakben a k'on ta' sbaj te p'ijilil.

Sok te ta't José te mayuk yijk'itayon a túkel te ta bel, ma stak ya kalbe te lok me ta sba te atelil, mayuk yax tak ya kalbe te lok me tas ba te jun, mayuk yax tak ya k'ax kuxh mats sok, ya naj stojol te ta banti ay ya ni wan tseen yotan kuun, wokola wal papá.

Sok te me' Antonia te joyob yak'obel te koltael, sok te wix kitsinab te k'axem tulán k'al ta tojol

jotik te kaxem ijk'al ajk'ubal ma jichuk juun ayon jotik so te k'ux ya kajbajotik. Sok te achix Amairani te la xjaben yootan sok te la koltayon te k'axemtal jawil.

Sok yokol a wal te nojptexwane Dra. Karen Salomé Caballero Mora, te la yakben kil te max xclub kotantil sok te juun yojtan las maliben te atelil juun te yal pastael, sok te spijil yotan te mayuk las mak. Sok yokol a yal te nojptexwane Dr. Oscar Morales te yuun te mukul yotan te koltawane sok te binti snopojta yotan yuun lek yax lok te atelil sok te lek te banti a benotiktal.

SOk ya kalbe wokol a yalil te chan t'ul pijil winiketik, Dr. Roberto Arceo, Dr. Marco Antonio, Dr. Luis Martin, te la yilil sok te la stojoltesikon yuun lek yax lok te atelil. Sok te Dr. Hugo de Leon te las koltayon ta pasel te bintil a sok te equipo, mayuk a p'ajawan.

Yokol a wal te CONAHCYT te las koltayon bitil te la nop te jun yuun te muk'ul juun, sok te yax koltate te achix sok keremetik yuun yax lok ta sba te sjun snopelik.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos sobre el flujo de partículas cósmicas, medidas con el detector de centelleo Escaramujo, en modo de doble coincidencia, es decir, coincidencia de medición en dos de las placas de plástico centellador. Las mediciones realizadas fueron de tres tipos:

- Observación de la modulación día-noche o variación diurna del flujo de partículas cósmicas. Se trata de una modulación esperada, provocada por la rotación de la Tierra en el ambiente del viento solar.
- Comparación del flujo de partículas cósmicas obtenido colocando un volumen de concreto entre las placas, con la medición obtenida sin separación y con una separación de 10 cm de aire. Esto con el objetivo de observar la atenuación del flujo, que se espera ocurra debido al concreto.
- Observación de los efectos de la presión atmosférica en el conteo de las partículas cósmicas medidas con el detector, y su posterior corrección con base en el cálculo del coeficiente barométrico. Esta corrección es necesaria ya que los efectos de la presión podrían enmascarar mediciones relacionadas con la física del clima espacial.

Los resultados correspondientes obtenidos son:

- Se observó la modulación diurna del flujo de partículas cósmicas, tal como se esperaba.
- Se comprobó que el concreto atenúa el flujo de doble coincidencia de las placas, como se esperaba. La magnitud de la atenuación del concreto es del $\sim 96\%$ respecto a la medición sin separación, y del $\sim 90.2\%$ con respecto a una separación con 10 cm de aire. Con los datos obtenidos también se pudo calcular la atenuación que provoca la separación de 10 cm de aire, que es del $\sim 56\%$, con respecto a la medición sin separación.
- Se observó por primera vez en la ubicación de Tuxtla Gutiérrez, con base en el cálculo del coeficiente barométrico, que la presión afecta el conteo de partículas que llegan a la superficie terrestre. Dicho coeficiente se usó para corregir el flujo por los efectos de la presión atmosférica en la medición de partículas cósmicas.

El detector Escaramujo ha permitido la formación de recursos humanos en la FCFM-UNACH, en el área de instrumentación y para conocer de primera mano los fenómenos relacionados con la medición de partículas cósmicas y el clima espacial. Se realizó por primera vez, para esta locación, el cálculo de una de las mediciones fundamentales para cualquier detector de partículas cósmicas, es decir, la corrección por presión atmosférica. En esta ocasión se usaron datos

proporcionados por instancias gubernamentales por día, y realizadas en otro lugar del municipio, los cuales no tenían la precisión y la frecuencia deseada. No obstante, en el laboratorio de Astrofísica se cuenta con un detector de presión y temperatura que es parte del experimento LAGO [37], el cual proporciona las mediciones con precisión de segundos. Dicha información se podrá usar en el futuro para repetir el tipo de corrección presentada en este trabajo.

xcholel

Ja te atelil ya yak ta ilel binti te a lok ta p'isel yuun te detector Escaramujo ta swenta yuun tsantsiwal ek, te la yay tundesel cheb placa detectora, te me juun partícula la stujchíntaj te cheb placa ya yay tsakel, te me juun la stujchíntaj ma ba tsakbil. Ox ten binti la yay yutel te pisel.

- La yal ilel te yax jel'xba te k'aleltik - ajk'ubaltik, te ta k'aleltik slamet uts te partícula, ma jichuk te ta ajk'ubaltik yax lamaj koel partícula. nabijstojol te yax jel'xba, ja te baluminal yax walk'o' su'tbej ta stojol ta yik'alel te k'al ja'ini ja yax jel'xba te te bi yipal yax xul te partícula lij ta balumilal.
- Spajel te bi yipal yax jul te partícula ek, te me ya yich ak'el muk'ul ton te ta yolil te cheb placa detectora, ya yich pajel sok te bi yipal yax sjul te ta cheb placa sok ya yich pajel sok te me lajuneb centimetro yiloxba cheb placa. Yuun ya yay ilel bi yipal yax tsuj te partícula yuun te muk'ul ton.
- Yilel te me ay ban binti yax utawan te yip te ík te binti xi yak'al ta pisel te tsantsiwal ek yuun te detector, sok te ya yay tojobtesel yuun te yip ík k'alal yax ox ta ilel te binti ya yak ta ilel. Tulal sk'oplal te stjobtesel yuun te ay binti xnak'otea ta stojol te ta jamal yuun te balumilal.

Te binti lok ta tusel yuun te atelil.

- La yay ilel te yax jel'xba te bi yipal yax jul te partícula, binti xi nopbil ya yay tael.
- Lok ta ilel te muk'ul ton lax comobtesbe yip te binti xi yax lok ta pisel yuun te cheb placa. binti yipal yax komobtesbe yip ja $\sim 96\%$ yuun sok te pak'al te placa. Sok $\sim 92\%$ te lajuneb centimetro yilosba te cheb placa. Te pak'al te cheb placa sok te lajuneb centimetro yax kom $\sim 56\%$.
- Ja to nax sba la yay ilel li ta Tuxtla Gutiérrez, te calculo te la yay pasel la yay nael stojol te yip te ík yax liksbaj te jayeb partícula yax jul ta baluminal.

Te detector Escaramujo uts spijubtese al nichan te ta mukul Escuela FCFM-UNACH. Sok ja to nax baj te binti k'ot ta pasel yuun te atelil sok te binti xi la yay tundesel te yip ík, te sp'isobil te yip te ík mayuk ta escuela, yuun l a yay leel ya yan, ja yuun te muk'ul lum Tuxtla, ma jichuk te binti yax spix te yip ík ay lix ta escuela te sbil te equipo ja LAGO [37], te ju jun ajk'a te ya snajk'an ta chinam jum. sok ta pajel chajwej lek yax k'ot ta pasel te me ay machaj yax mulanbet yotan.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimiento	III
Resumen	V
1. Introducción	3
1.1. Rayos cósmicos	3
1.1.1. Composición	3
1.1.2. Espectro de energía de los rayos cósmicos	4
1.2. Cascadas atmosféricas extendidas	6
1.2.1. Componente Electromagnética	7
1.2.2. Componente Hadrónica	8
1.2.3. Componente Muónica	8
1.3. Detección de los rayos cósmicos	9
1.3.1. Detectores de Centelleo	9
1.3.2. Detectores orgánicos	10
1.3.3. Detectores inorgánicos	10
2. Detector Escaramujo	13
2.1. Funcionamiento del detector	13
2.1.1. Placas centelladoras	14
2.1.2. Fotomultiplicador SiPM	16
2.1.3. Preamplificador	16
2.1.4. Tarjeta QuarkNet	17
2.1.5. Minicomputadora Raspberry	19
2.2. Primeras mediciones realizadas con Escaramujo	20
2.2.1. Operación y buen funcionamiento del detector	20
2.2.2. Medición del flujo de Muones en función de la altura	22
3. Variación diurna y atenuación del flujo medidas con Escaramujo	25
3.1. Observación de la variación diurna	25
3.2. Observación de la atenuación del flujo	26
3.3. Mediciones sin separación de las placas	27
3.3.1. Mediciones en el mes de octubre	29
3.3.2. Mediciones en el mes de noviembre	30
3.3.3. Mediciones en el mes de diciembre	30

3.3.4. Discusiones sobre los resultados sin separación	30
4. Corrección por Presión	35
4.1. Coeficiente por efecto barométrico	35
4.2. Corrección por presión para un tiempo de tres semanas	36
4.3. Corrección por presión para un tiempo de mes y medio	41
5. Conclusiones	51
Bibliografía	52

Capítulo 1

Introducción

A la atmósfera de la Tierra llegan constantemente diversos tipos de radiación proveniente del espacio exterior, como son ondas de radio, radiación infrarroja, rayos X, neutrinos, rayos gamma y rayos cósmicos [1] (los tres últimos son llamados astropartículas o partículas cósmicas). Los rayos cósmicos son el tema de estudio de esta tesis.

1.1. Rayos cósmicos

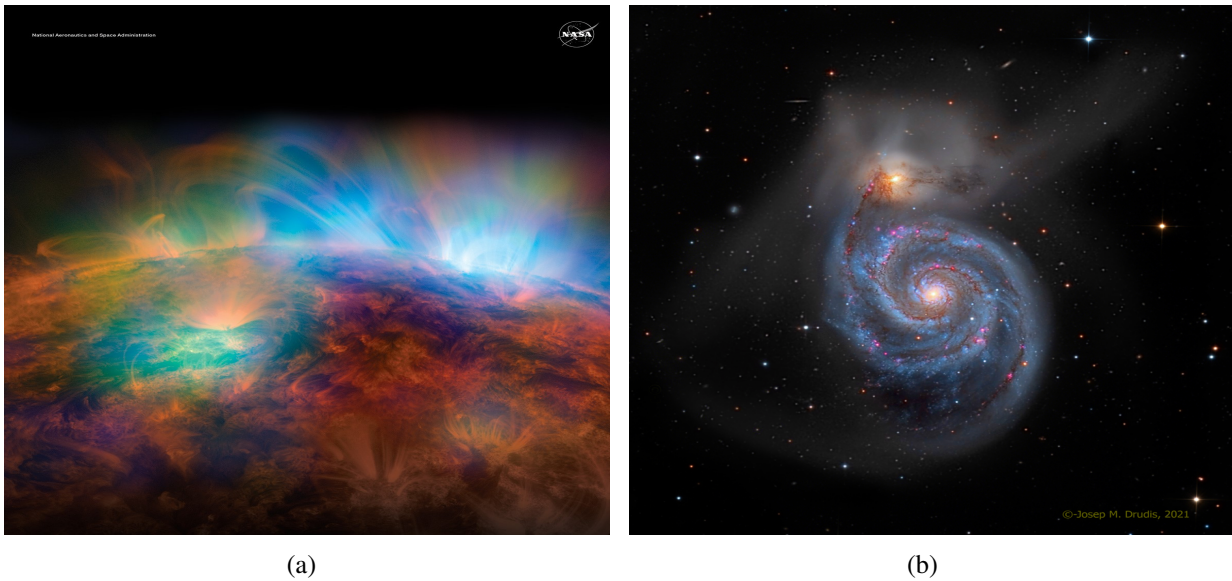
Los Rayos Cósmicos (RC), también llamados radiación cósmica, son partículas cargadas provenientes del espacio exterior, compuestas por núcleos de átomos estables despojados de todos sus electrones. Una de sus principales características es que son partículas de muy alta energía y para estudiarlas se clasifican en:

- Rayos cósmicos solares: son los de menor energía y son eventos transitorios.
- Rayos cósmicos galácticos: desde 100 MeV hasta $\sim 10^{15}$ eV.
- Rayos cósmicos extragalácticos: con energías mayores a 10^{15} eV.

Los RC solares, como su nombre lo indica, se originan en el Sol durante eventos explosivos como son ráfagas o eyecciones de masa coronal (ver figura 1.1 a)). Los RC galácticos tienen sus fuentes dentro de la galaxia en objetos astrofísicos o eventos catastróficos que pueden ser supernovas u ondas de choque en el medio interstelar. Por su parte, los RC extragalácticos, también denominados de ultra-altas energías (UHECR por sus siglas en inglés), se cree que tienen su origen fuera de la galaxia pero aún no se ha llegado a una conclusión exacta [3]. Se piensa que los UHECR son acelerados dentro de núcleos de una clase de galaxias denominadas activas (ver figura 1.1 en el panel b)), este tipo de galaxias tienen en su centro agujeros negros supermasivos que aceleran la materia cercana y provocan interacciones altamente energéticas, las cuales pueden producir rayos cósmicos que salen de la influencia del agujero negro supermasivo y llegan a alcanzar nuestra galaxia y el sistema solar [1].

1.1.1. Composición

La composición de los rayos cósmicos es similar a la materia ordinaria que conocemos en la tabla periódica, pero con mayor abundancia en algunos elementos. En la figura 1.2 podemos



(a)

(b)

Figura 1.1: En el panel a) podemos observar un ejemplo de la actividad solar [4]. En el panel b) la galaxia Whirlpool M51 [6].

observar una comparación de la abundancia de elementos presentes en los RC y la abundancia de elementos presente en el sistema solar. Esta gráfica se obtuvo por medio de mediciones que se realizan en la Tierra y datos recabados por los instrumentos AMS-02 (H, He), ACE/CRIS (Li-Ni) y TIGER/SuperTIGER (Cu-Zr) [1, 2]. Lo primero que podemos observar es que la abundancia de los elementos ligeros en nuestro sistema solar es similar a la abundancia presente en los RC. Esto es debido a que el hidrógeno y el helio son los elementos más abundantes en el Sol, nuestro Sol sintetiza helio a partir de hidrógeno a una temperatura cercana a 1 KeV (15 millones de grados Celsius) y el Sol se encuentra así desde hace 4600 millones de años y continuará así durante otros 5000 millones de años más, el hidrógeno es de los elementos muy difíciles de ionizar en comparación con los núcleos pesados. [1].

Una segunda diferencia es que los elementos litio, berilio y boro son más abundantes en la radiación cósmica que en el sistema solar. Esto se debe a que estos elementos son el producto de la fragmentación de núcleos más pesados. Una última diferencia es la sobreabundancia de los núcleos de escandio, titanio y vanadio, esto se debe al mismo proceso de fragmentación mencionado anteriormente [1].

En lo que respecta a las energías más altas, se ha reportado que en el rango entre los 150 PeV's ($10^{15} eV$) y los 2 EeV's ($10^{18} eV$), la composición de la masa primaria promedio corresponde a elementos ligeros, por el otro lado, sobre los 2 EeV's la razón de cambio de la composición de la masa, se vuelve muy pequeña, lo que significa que tiende a ser pesada. La observación de estas masas, involucra procesos de emisión, mecanismos de aceleración, pérdidas y escapes desde los entornos de las fuentes, así como efectos de propagación [3].

1.1.2. Espectro de energía de los rayos cósmicos

El espectro de energía de los RC indica el flujo de partículas en función de su energía, dicho flujo se mide directa o indirectamente dependiendo de la energía. Las mediciones directas se

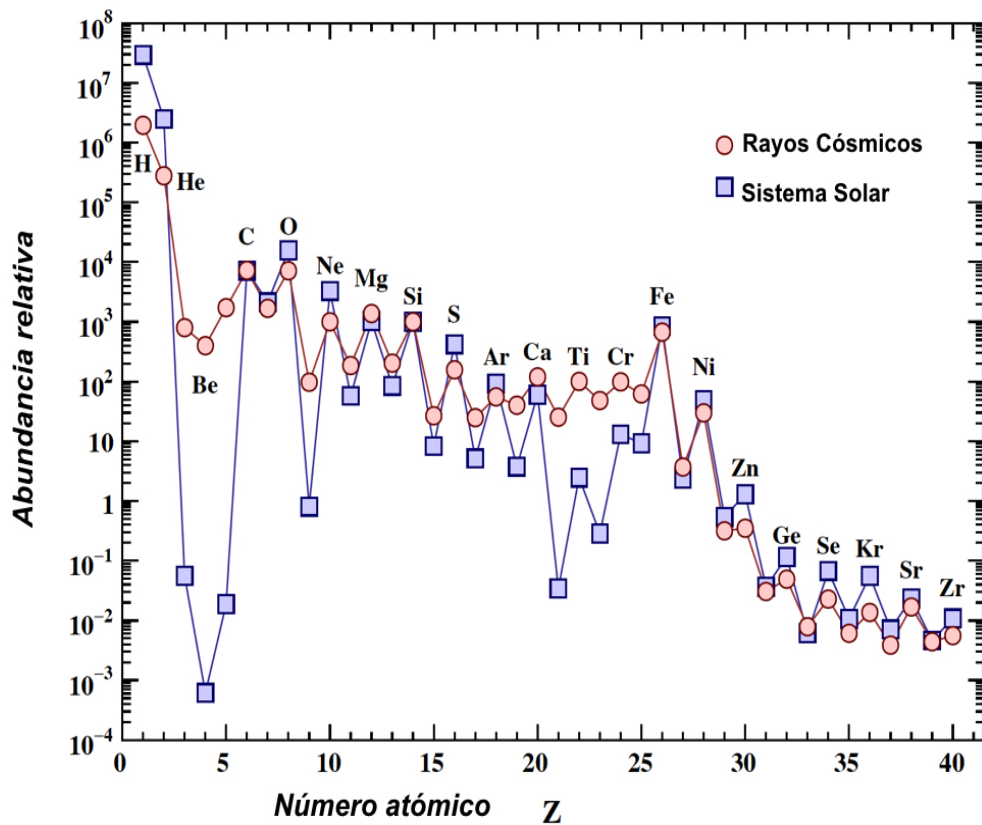


Figura 1.2: Abundancia relativa de núcleos atómicos observados en el sistema solar y en los rayos cósmicos galácticos, normalizada a $\text{Si}=10^3$ (modificado de [2]).

realizan por experimentos espaciales o por globos a energías hasta de $10^6 \text{ GeV}'s$ (ver figura 1.3). Las interacciones atmosféricas de los RC primarios producen flujos de partículas secundarias que se pueden detectar en la atmósfera, en la superficie de la Tierra o bajo suelo. Para altas energías, se pueden detectar los chubascos atmosféricos de partículas generadas por una sola partícula primaria (se describe en la siguiente sección). La figura 1.4 muestra el flujo multiplicado por un factor de $E^{2.6}$ para que se noten distintas regiones del espectro. Entre $10^{15} \text{ eV}'s$ y $10^{16} \text{ eV}'s$ se puede observar la *rodilla*, a una energía de $10^{17} \text{ eV}'s$ existe un cambio en el índice espectral conocido como *segunda rodilla*, alrededor de $10^{18.5} \text{ eV}'s$ se encuentra una región llamada *tobillo* [2]. A una energía aproximada de $10^{19.2} \text{ eV}'s$ se ha podido descubrir recientemente una forma llamada *empeine* [2, 3]. A partir de $5 \times 10^{19} \text{ eV}'s$ y hasta más allá de $10^{20} \text{ eV}'s$, se ha reportado evidencia de una supresión del flujo, conocida como el corte GZK, la propagación de los UHECR sobre distancias extragalácticas incluyen la interacción con el fondo cósmico de microondas, lo que pudiera ser el origen de esta supresión [2, 3].

El espectro sigue una ley de potencias de la forma siguiente:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

donde γ es el índice espectral (que toma diferentes valores dependiendo de la energía) [2, 7, 8].

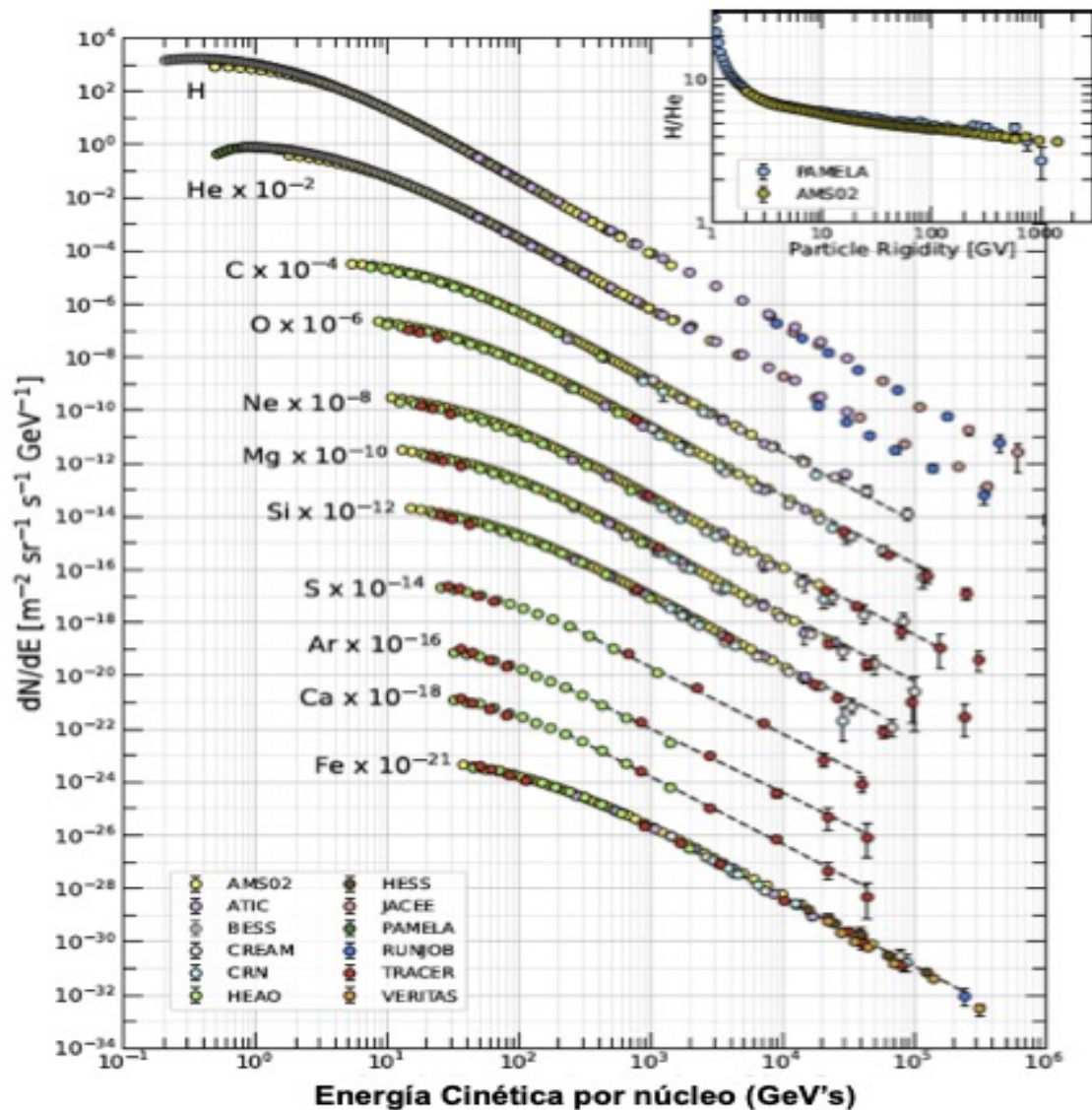


Figura 1.3: Flujos de núcleos de los RC primarios en partículas por energía por núcleo. El recuadro muestra la razón de H/He como función de la rigidez [2].

1.2. Cascadas atmosféricas extendidas

La atmósfera de la Tierra se extiende un poco más allá de los 100 km sobre el nivel del mar. El 75 % de su masa se concentra en 11 km medidos desde la superficie y está compuesta en un 78 % de nitrógeno y 21 % de oxígeno, el restante 1 % se compone de argón, vapor de agua y CO_2 [1, 5]. Como se mencionó anteriormente, los RC que llegan a la parte superior de la atmósfera son denominados RC primarios o partículas primarias. Cuando éstas ingresan a la atmósfera terrestre chocan con los átomos y moléculas que la componen, dando como resultado la creación de millones de partículas secundarias formando lo que se conoce como chubasco (o cascada) atmosférico extendido de partículas (o EAS, por sus siglas en inglés). Los procesos de producción de partículas secundarias se dividen en blandos y duros [8]. También puede ocurrir una variedad de procesos de absorción y dispersión (elástica o inelástica) de las partículas en

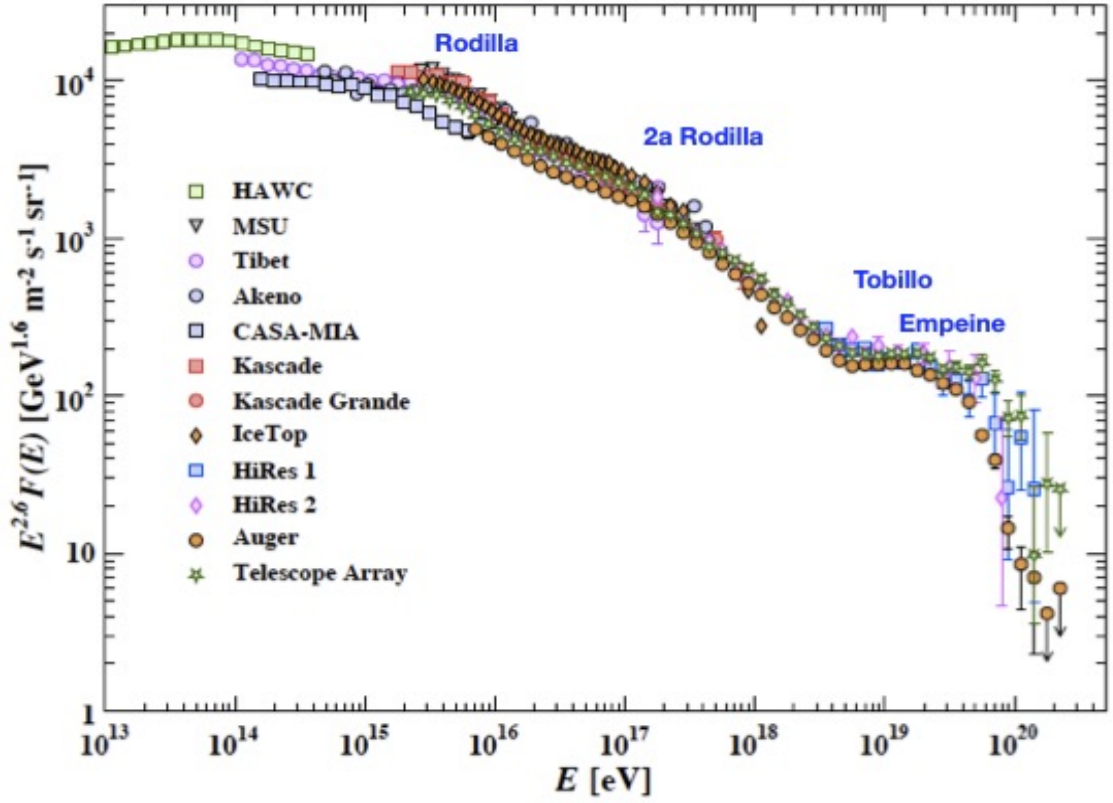


Figura 1.4: Espectro de energía de los RC medido por diferentes experimentos (modificado de [2]).

los átomos y moléculas presentes llegando a disipar la energía en la atmósfera; o pueden llegar hasta la superficie e incluso pueden llegar a penetrar grandes distancias por debajo de la corteza terrestre. En la figura 1.5 se muestra una imagen del desarrollo de un chubasco atmosférico en la atmosfera de la Tierra. Las partículas secundarias están compuestas en su mayoría por electrones, positrones y fotones ($\sim 90\%$), muones ($\sim 9\%$) y apenas un 1% de partículas hadrónicas [8]. Por lo tanto, un chubasco típico tiene tres componentes: electromagnética, hadrónica y muónica. Se discutirá brevemente cada una de ellas en las siguientes secciones.

1.2.1. Componente Electromagnética

La componente electromagnética agrupa electrones, fotones y positrones, estas partículas son el resultado del decaimiento de piones neutros, como podemos ver en la siguiente expresión:

$$\pi^0 = \gamma + \gamma \quad (1.2)$$

Esta componente se desarrolla de manera muy rápida, pero debido a los procesos radiativos también es la que más interactúa y decae rápidamente, disminuyendo su energía hasta ser absorbida por la atmósfera [1]. Las interacciones antes mencionadas se pueden representar por las siguientes cadenas de reacción:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.3)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma \quad (1.4)$$

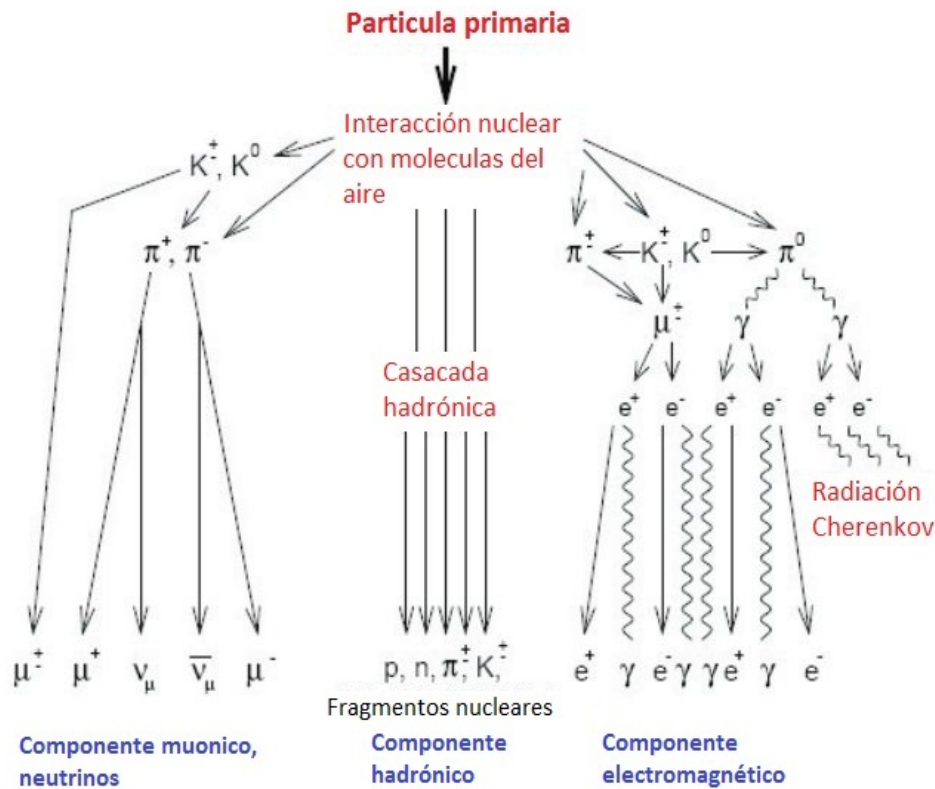


Figura 1.5: Desarrollo de un chubasco atmosférico extendido (EAS) con sus tres componentes [10].

1.2.2. Componente Hadrónica

Está constituida por piones, Kaones y bariones, se encuentran predominantemente a lo largo del eje de la cascada. La producción hadrónica se da cuando por ejemplo el RC primario es un protón y choca con otro protón en reposo, en sus secundarios aparece un hadrón secundario, pero el más frecuente es un barión (protón-neutón) [8]. El decaimiento para piones positivos se expresa como:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad (1.5)$$

Para piones negativos:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad (1.6)$$

1.2.3. Componente Muónica

En el Modelo Estándar de la física de partículas encontramos a los muones en el grupo de los leptones que pertenece a la segunda generación de fermiones. Los piones cargados y kaones son partes fundamentales en la producción de los muones. Si la energía del pion cargado es mayor que 30 GeV la probabilidad de una colisión es alta y en su decaimiento genera más piones de menor energía, pero por debajo de los 30 GeV tiene mayor probabilidad de decaer dando como resultado un muón y un neutrino.

Los muones tienen la misma carga eléctrica que el electrón pero son unas 200 veces más masivos, son inestables con una vida media de $\tau = 2.197 \mu s$ [1], su decaimiento se da como:



Debido a su masa y a la ausencia de interacciones fuertes, los muones son extremadamente penetrantes. En la atmósfera el número de muones aumenta con la profundidad siendo el tipo de partícula más abundante en la superficie terrestre y por debajo de ella.

1.3. Detección de los rayos cósmicos

La partícula primaria, antes de interactuar, preserva la información acerca de su origen, dirección de llegada y energía inicial. Una vez que empieza a interactuar se provocan una serie de procesos radiativos por los cuales se generan millones de partículas secundarias, como se mencionó anteriormente. Éstas pueden llegar a los distintos tipos de detectores que observan dichos procesos y que las reciben en la superficie o bajo suelo. La mayoría de la información de la partícula primaria se distribuye en las partículas secundarias y una parte se pierde en la atmósfera. Con la información recolectada con los detectores, se puede reconstruir o rescatar la información de la partícula primaria, es decir, se puede inferir su naturaleza de manera indirecta [17].

Como se mencionó anteriormente, para el estudio de los RC existen dos formas de detección: directa e indirecta. La detección directa se refiere a pequeños detectores puestos en la órbita de la Tierra, instalados en satélites e incluso en la Estación Espacial Internacional, así como globos que se mueven en la alta atmósfera. La desventaja de estos detectores es que cubren un área muy pequeña por lo que no sería posible detectar RC primarios de muy alta energía, que como ya sabemos, son muy escasos. La detección indirecta, por su parte, consiste en la detección de las partículas secundarias por medio de un arreglo de detectores que cubre un área muy extensa, incluso de cientos de kilómetros [17]. En la figura 1.6 se muestra una tabla con algunos instrumentos de detección de RC y el tipo de técnica al que pertenece.

Las técnicas de detección han ido mejorando a lo largo de las décadas, desde la primera vez que el físico Austriaco Victor Franz Hess las midió con sus electros copios hasta detectores que cubren km^2 y que están instalados en diferentes partes del mundo. Algunos ejemplos de estos grandes detectores se observan en la figura 1.7 tales como el Observatorio Pierre Auger [11] (Argentina), el experimento HAWC [12] (situado en la sierra de Puebla México), KASCADA-DE [13] (Alemania), Tunka-133 [14], AGASA [15] y FLY'S EYE [16].

1.3.1. Detectores de Centelleo

Los detectores de centelleo están compuestos de materiales especiales, los cuales al ser expuestos a la radiación ionizante emiten una pequeña cantidad de radiación en el espectro visible, como su nombre lo dice, *centellean* [19, 20]. Este fenómeno físico ocurre cuando la radiación ionizante penetra en el material e interactúa con sus átomos, es decir, transfiriendo una parte o el total de su energía a los átomos del material. De este modo, una gran cantidad de átomos se excitan o se ionizan y al volver a su estado fundamental emiten fotones que se encuentran en frecuencias correspondientes al espectro visible. Un ejemplo de un material centellador lo

Tipo	Técnica	Rango de Energía	Exp. y sensibilidad a composición
dir.	Espectrómetro	1-200 GeV	AMS (p-He), BESS (p,He), HEAO (CNO-Fe)
dir.	Calorímetro	30 GeV-500 TeV	ATIC (todas), CREAM (todas)
dir.	Cámaras de emulsión	100-500 TeV	JACEE, RUNJOB (todas)
ind.	Calorímetro de hadrones	500 GeV-1 PeV	KASCADE, EAS-TOP (p)
ind.	Espectrómetro de muones	100 GeV-10 TeV	L3+C (mayormente p,He)
ind.	Cherenkov + TeV μ	50-300 TeV	EAS-TOP/MACRO (p,He,CNO)
ind.	Detectores de centelleo ($N_e - N_\mu$)	100 TeV-10 PeV	GRAPES, KASCADE, EAST-TOP (todas)
ind.	Cámaras de emulsión	5-300 TeV	Tibet AS $_\gamma$ (p,He)
ind.	Telescopios de fluorescencia	$10^{17.2} eV$	HiRes
ind.	Tanques de agua Cherenkov	100 PeV-1 EeV	Haverah Park
ind.	Cherenkov atmosféricos	100 PeV-100 EeV	Yakutsk
ind.	Detectores de centelleo (N_{eh})	100 TeV-1 EeV	KASCADE -Grande
ind.	Detectores de centelleo	100 PeV-100 EeV	AGASA
ind.	Cherenkov, fluorescencia	1-100 EeV	Observatorio Pierre Auger

Figura 1.6: Técnicas de detección de RC y los experimentos que se usan [17].

podemos ver en la figura 1.8. En los materiales centelladores existen dos procesos de emisión de luz:

1. **Fluorescencia:** Es un proceso instantáneo, en escalas de tiempo de transiciones atómicas del orden de los 10 ns posteriores a la interacción de la radiación con el material centellador [18].
2. **Fosforescencia:** Contrario a la fluorescencia, éste es un proceso retardado debido a que la excitación de la radiación incidente da lugar a un estado metaestable que puede durar minutos hasta horas dependiendo del material [18].

1.3.2. Detectores orgánicos

“Los componentes principales son hidrocarburos aromáticos, materiales ricos en carbono e hidrógeno, sus fórmulas químicas son: $C_{18}H_{14}$, $C_{24}H_{22}N_2O$, $C_{15}H_{11}NO$, y $C_{24}H_{16}N_2O_2$. Los centelladores orgánicos más usados se encuentran en soluciones líquidas o matrices poliméricas, que dan origen a los centelladores plásticos” [18].

1.3.3. Detectores inorgánicos

“Estos centelladores son cristales fabricados en hornos de altas temperaturas. Los más usados son haluros de metal alcalino, un compuesto binario de un metal del grupo 1 con un halógeno (yodo, flúor). La ventaja sobre los orgánicos es que tienen una alta densidad y un alto número atómico” [18].

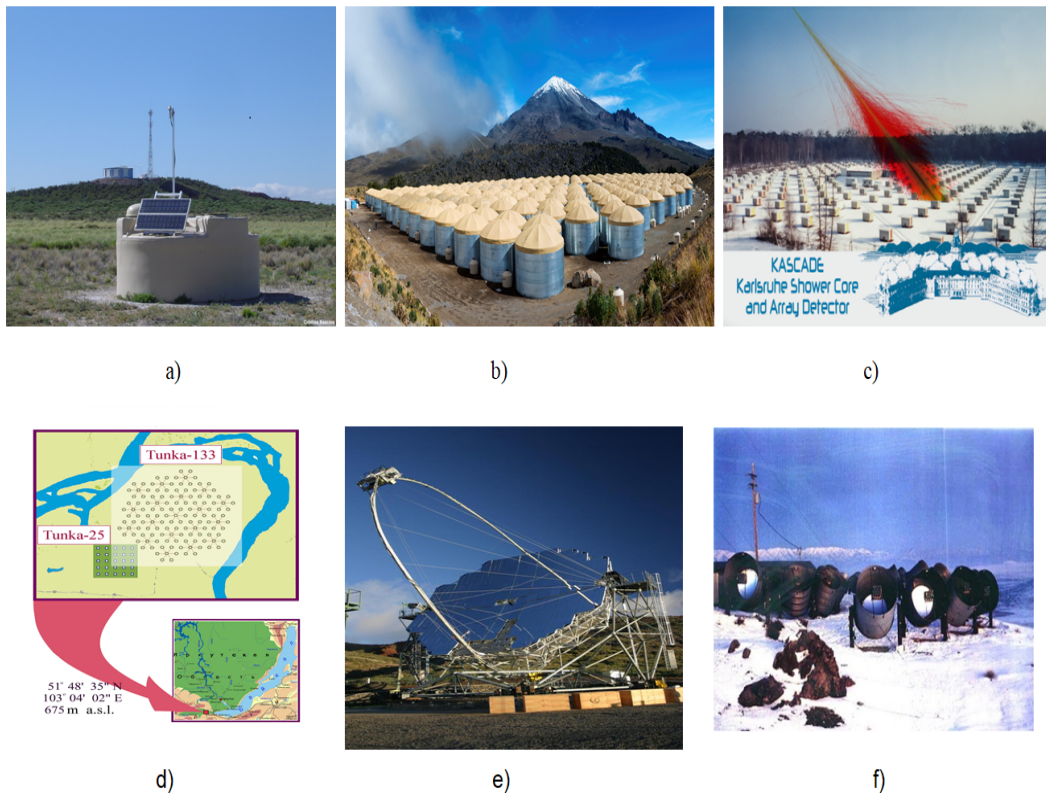


Figura 1.7: Algunos experimentos con distintas técnicas de medición: a) Observatorio Pierre Auger [11], b) HAWC [12], c) KASCADE [13], d) Tunka [14], e) AGASA [15] y f) Fly's eye [16].

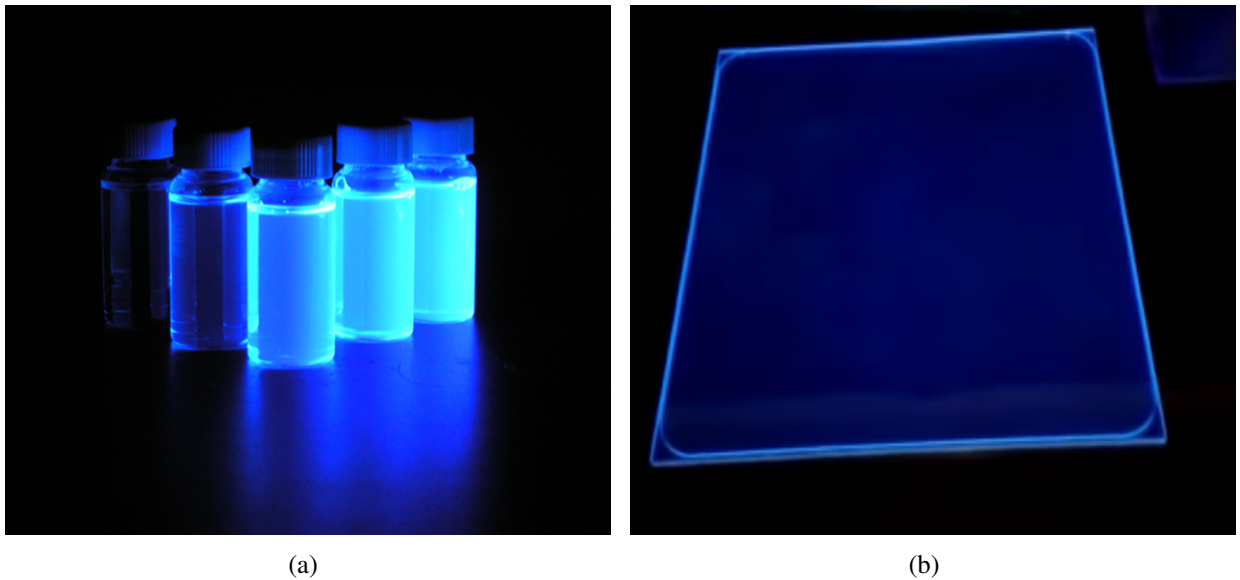


Figura 1.8: Ejemplos de detectores centelladores a) Centellador líquido [19], b) Placa de plástico centellador comercial [20].

Capítulo 2

Detector Escaramujo

El detector Escaramujo (DE) se obtuvo en el marco del proyecto del mismo nombre, el cual consistió en una serie de cursos en Laboratorio sobre instrumentación de Física de Altas Energías y Astropartículas, impartidos por el físico Federico Izraelevitch, que junto con su familia emprendieron un viaje desde el laboratorio Fermilab, Chicago, Estados Unidos, hasta Buenos Aires, Argentina. A lo largo de este viaje pasaron por diferentes universidades de México, Guatemala, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay y Argentina. El objetivo principal del curso consistía en que un grupo de alumnos y docentes armara desde cero un detector de RC: el detector Escaramujo. Este detector se quedaría en cada institución para hacer estudios en física de astropartículas, física básica y divulgación de las ciencias con la finalidad de despertar interés en esta rama a las nuevas generaciones. Los talleres se impartieron en instituciones en las que no se cuenta con muchos recursos para adquirir equipo de estas características, con el ideal de enfatizar el que, así como el Escaramujo, una rosa silvestre, la ciencia puede florecer en cualquier lugar [21].

2.1. Funcionamiento del detector

El detector Escaramujo actualmente se encuentra en las instalaciones de la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH (FCFM-UNACH). Es un detector centellador que consta de tres placas centelladoras del modelo EJ-200, con sus correspondientes fotomultiplicadores de Silicio (MicroFC-60035-SMT, SensL) conocidos también como (SiPM), Preamplificador de cuatro potencializadores, Tarjeta QuarkNet, GPS, Sensor de temperatura, minicomputadora Raspberry y un monitor [23]. Para los propósitos de este trabajo se usaron solo dos de las placas; algunos de los componentes se pueden apreciar en la figura 2.1. Una vez armado el detector y con las calibraciones necesarias se puede dar inicio a la detección de RC. Como se mencionó en el capítulo anterior respecto a las cascadas atmosféricas, las partículas más penetrantes, y que por lo tanto llegan con mayor frecuencia a la superficie terrestre son los muones. Cuando un muón incide e interactúa con las placas centelladoras, se emite una luz que es captada por el SiPM y en caso de que se supere un umbral y trigger establecido, la señal pasa por los preamplificadores y posteriormente es procesada por la tarjeta Quarknet. Toda esta información se puede almacenar con ayuda de la Raspberry PI en un documento.txt para su posterior análisis.

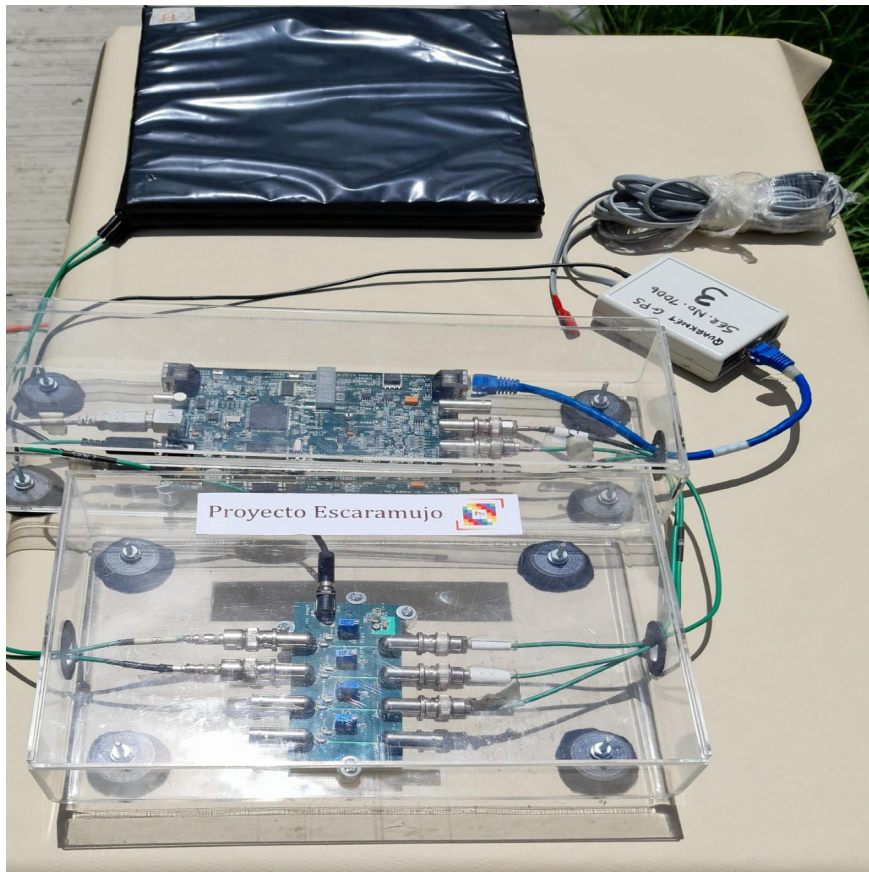


Figura 2.1: Foto de los componentes que tiene Escaramujo.

2.1.1. Placas centelladoras

Se trata de centelladores de plástico que corresponden a la categoría más extendida dentro de los usados en el ámbito de física nuclear y física de altas energías. Éstos constan de una matriz polimérica (un plástico base) con un material centellador disuelto. En su proceso de fabricación, el material centellador primario se disuelve en el solvente precursor para luego polimerizar la solución, dando lugar al plástico con el centellador disperso en forma homogénea. Los plásticos base más utilizados son el poliestireno, el polimetilmetacrilato (más conocido como acrílico) y el polivinil tolueno [25].

Las placas EJ-200 combinan las dos propiedades importantes de una longitud de atenuación óptica larga y una temporización rápida [24]. Las Placas centelladoras de Escaramujo son el componente principal y actúan como una especie de antena receptora. Las placas están forradas por varias capas de diferentes materiales. El forro interno es de papel Tyvek de alta reflectividad difusa y tiene la función de guiar la luz de centelleo al fotomultiplicador de silicio (SiPM), a través del principio físico de reflexión total interna. El forro exterior es con papel EMI/static shield Type 1 class 1 (ver figura 2.2) el cual evita que luz externa penetre al centellador [22], recientemente se añadió un recubrimiento extra de plástico para protección. Las propiedades de las placas centelladores EJ-200 se pueden consultar en el cuadro 2.1.



Figura 2.2: a) Placa EJ-200 antes de ser forrada [21]. b) 2 placas EJ-200 forradas con papel EMI/Static (exterior) y Tyvek (interior), con dimensiones de 25 x 25 x 1 cm³.

Eficiencia de centelleo	10,000 fotones/1 MeV e-
Longitud de onda de máx. Emisión	425 nm
Rise Time (Tiempo de subida)	0.9 ns
Decay Time (Tiempo de decaimiento)	2.1 ns
Ancho de pulso	~ 2.5 ns
Índice de refracción	1.58
Base de polímero	Poliviniltolueno
Longitud de atenuación de luz	380 cm
Átomos de H por cm ³	5.17 x 10 ²²
Átomos de C por cm ³	4.69 x 10 ²²
Electrones de cm ³	3.33 x 10 ²³
Densidad	1.023g/cm ³
Emisión de Luz (antraceno)	64 %
Rango de temperatura	-20 a 60 grados Celsius

Cuadro 2.1: Propiedades de la placa EJ-200 reportadas por el fabricante [22].

2.1.2. Fotomultiplicador SiPM

El fotomultiplicador de silicio MicroFC-60035-SMT SensL (SiPM: Por sus siglas en inglés) está formado por cientos de fotodiodos de avalancha. Cada fotodiodo se opera en modo Geiger, es decir, produce una avalancha de electrones cuando recibe al menos un fotón e independientemente de su número o energía, uno de ellos se puede observar en la figura 2.3. El SiPM MicroFC-60035 (sensL) es sensible a la radiación visible y está compuesto de 18980 microceldas de un tamaño de $35 \mu\text{m}$ con un sensor de área activa de $6 \times 6 \text{ mm}$, salida rápida típica del rise de 1 ns y ancho de pulso de 3.2 ns [26]. El SiPM se ha convertido en un detector alternativo en muchas aplicaciones, reemplazando los tubos fotomultiplicadores de vacío (PMT) y los tubos fotomultiplicadores de ánodo múltiple (MAPMT). A temperatura ambiente, se pueden utilizar cuando se trata de detección de fotones múltiples y se requiere un bajo voltaje de operación, bajo consumo de energía, insensibilidad a los campos electromagnéticos, baja resolución espacial y compacidad [27].

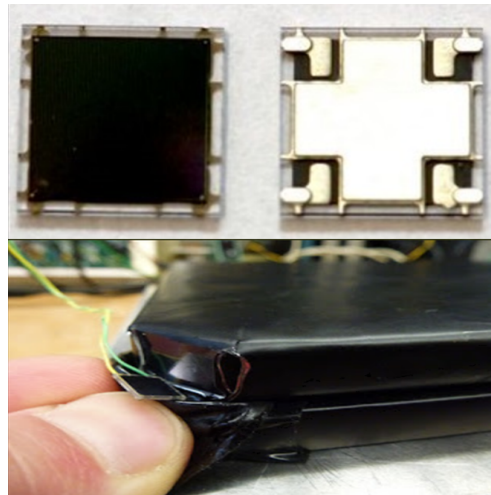


Figura 2.3: Imagen de un detector SiPM y el lugar donde se colocan en las placas centelladoras [21].

2.1.3. Preamplificador

Se trata de una tarjeta encargada de regular el voltaje de polarización. Sus componentes principales de acuerdo con la figura 2.4 son:

1. Entrada de alimentación de la tarjeta preamplificadora.
2. Canales que vienen del SiPM.
3. Canales que se dirigen a la tarjeta QuarkNet.
4. Potenciómetros.

El voltaje de polarización se encuentra en el intervalo de 27 V a 36 V (este voltaje se regula para salvaguardar los SiPM, estos ajustes se realizan mediante los potenciómetros que se encuentran en la tarjeta, con la ayuda de un multímetro se puede ajustar al óptimo) [22].

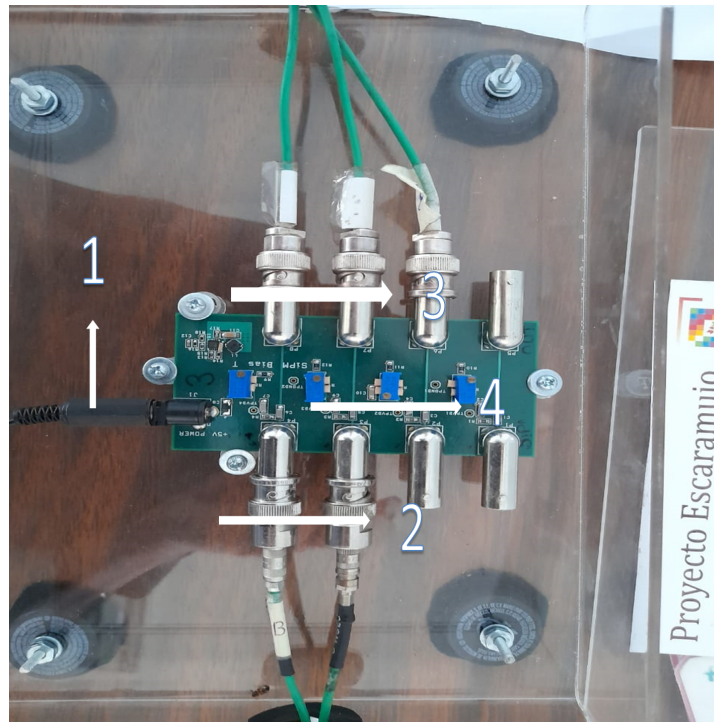


Figura 2.4: Preamplificador de cuatro canales, de los cuales solo se usan dos en este trabajo.

2.1.4. Tarjeta QuarkNet

Es una tarjeta de adquisición electrónica muy compleja, diseñada por el laboratorio Fermilab, USA y es una de las partes principales del DE [28], de acuerdo con la figura 2.5 consta de las siguientes componentes:

1. Entrada del GPS y el sensor de temperatura.
2. Salida a otra tarjeta DAQ (adquisición de datos).
3. Botón de reinicio de la tarjeta.
4. Monitor display, o contador de coincidencias.
5. Entrada de los cuatro canales que vienen del preamplificador.
6. CPLD (Complex Programmable Logic Device), dispositivo lógico complejo programable. Se controla desde la minicomputadora Raspberry.
7. Chip de medición de tiempo (TMC).
8. Puerto USB (Salida a la computadora).
9. Entrada de 5 V de corriente directa de carga.
10. Salida de voltaje de carga.

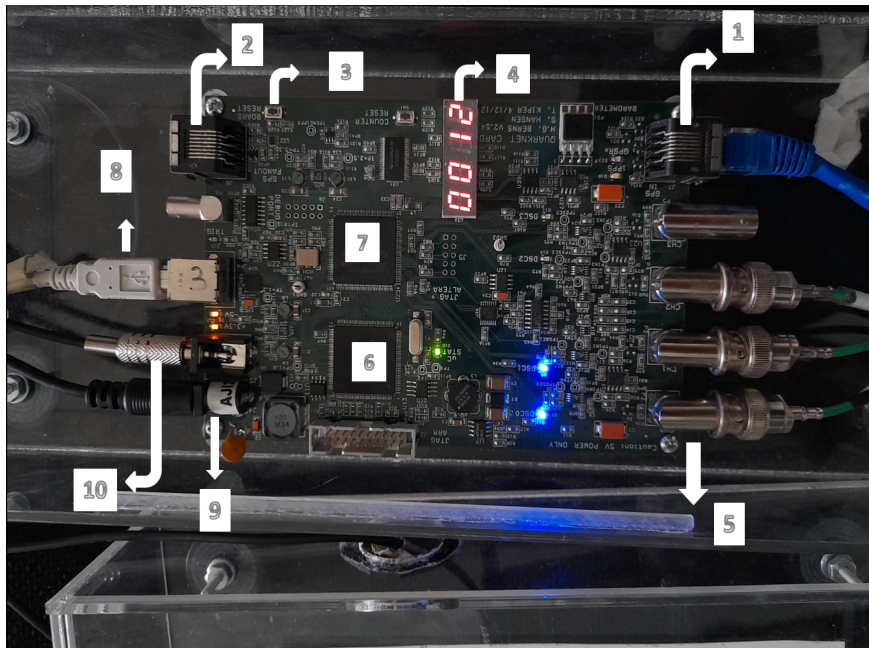


Figura 2.5: La tarjeta QuarkNet.

La tarjeta QuarkNet se encarga de recibir las señales analógicas y las convierte a digitales. La tarjeta también cuenta con un monitor display del trigger o número de triggers, que nos señala el número de coincidencias que ocurran entre las placas. Cabe mencionar que estas mediciones siempre irán acompañadas de errores además de ruido electrónico, por lo que es necesario un procesamiento y análisis posterior. Durante la adquisición de datos, la información se entrega en formato ASCII. Cada línea contiene 16 palabras (contando de izquierda a derecha) [22, 28], como se muestra a continuación:

```
BEDCF0F2 B6 00 00 00 00 00 00 00 BDF34BF9 203045.047 090821 A 10 0 +0053
BEDCF0F2 00 00 3B 00 00 00 00 00 BDF34BF9 203045.047 090821 A 10 0 +0053
BEDEB721 A8 00 2D 00 00 00 00 00 BDF34BF9 203045.047 090821 A 10 0 +0053
BF90B8EF B1 00 00 00 00 00 00 00 BF70C439 203046.039 090821 A 10 0 +0061
BF90B8F0 00 00 37 00 00 00 00 00 BF70C439 203046.039 090821 A 10 0 +0061
BF90B8F0 00 00 00 38 00 00 00 00 BF70C439 203046.039 090821 A 10 0 +0061
C04E5E8E AA 00 00 00 00 00 00 00 BF70C439 203046.039 090821 A 10 0 +0061
```

Las columnas del 0 al 9 están en formato hexadecimal. Los datos que se muestran son para un único evento, un solo evento puede abarcar varias líneas de datos, esto dependerá del tipo de configuración que se imponga, veto sin veto, gate, etc. Las columnas del 2 al 9 indican los tiempos de los flancos de subida y bajada del evento en tiempos de nanosegundos. La columna 12 indica la fecha del evento, el resto de los datos pueden ser utilizados para hallar el tiempo absoluto en el cual ocurrió el evento [22, 28].

Antena GPS

Se cuenta también con una antena GPS que es indispensable para poder obtener los datos en tiempo real. La antena se encarga de buscar satélites en órbita y de sincronizarse con ellos, es

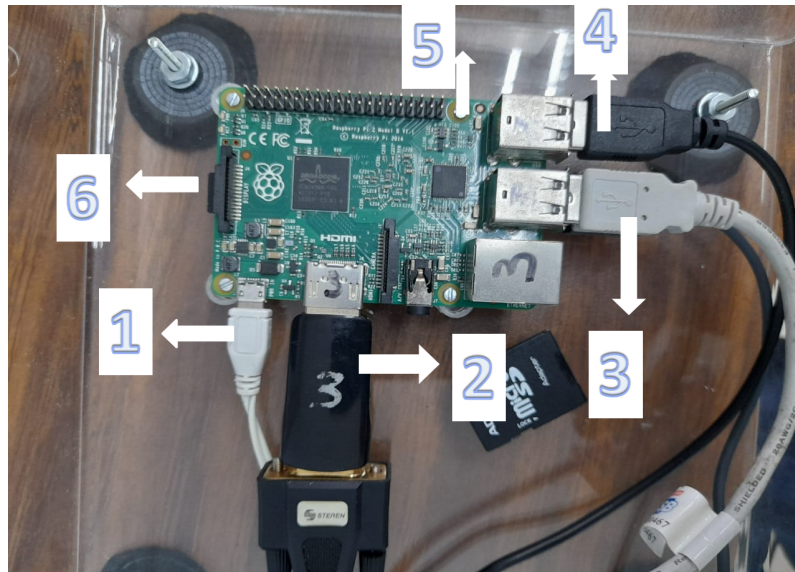


Figura 2.6: La minicomputadora Raspberry encargada de procesar los datos.

decir, el GPS proporciona el UTC (hora universal coordinada) absoluto de cada conteo, con una precisión de 50 ns [28].

2.1.5. Minicomputadora Raspberry

se trata de una computadora normal como cualquier otra, pero la diferencia es el tamaño y el software con el que trabaja (Minicom), lo cual la hace un equipo versátil que se puede mover a cualquier lugar. En la figura 2.6 se aprecia la minicomputadora, sus componentes son:

1. Entrada para la alimentación para la minicomputadora Raspberry.
2. Entrada para VGA para el monitor.
3. Entrada tipo USB-A que se conecta con la tarjeta QuarkNet.
4. Entrada tipo USB-A para teclado y ratón.
5. Cuerpo general de la computadora Raspberry.
6. Entrada para una tarjeta de memoria, usada para guardar datos generados en la QuarkNet.

El uso de la minicomputadora empieza desde el momento en el que llega el pulso de forma digital desde la tarjeta QuarkNet, siempre y cuando supere el umbral establecido, los datos acumulados son posteriormente procesados y analizados.

2.2. Primeras mediciones realizadas con Escaramujo

En esta sección se describen tres mediciones realizadas con Escaramujo (los resultados no forman parte de este trabajo), una de ellas con el objetivo de encontrar el voltaje de operación óptimo del aparato, las otras dos sirvieron para comprobar el funcionamiento y la eficiencia del mismo, así como para realizar primeras prácticas de laboratorio con estudiantes y profesores de la FCFM-UNACH.

2.2.1. Operación y buen funcionamiento del detector

Para obtener estas mediciones se utilizaron tres placas centelladoras, se realizaron dentro de las instalaciones del Centro Mesoamericano de Física Teórica (MCTP), en Ciudad Universitaria, a las afueras de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas [22]; los objetivos del trabajo fueron:

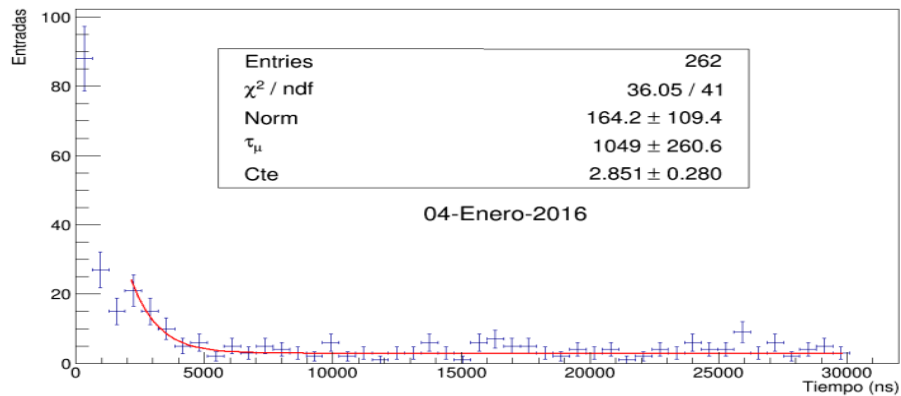
1. Verificar las condiciones en las que el detector arroja resultados acordes con mediciones de la física ya conocida.
2. Obtener una medición aceptable de la vida media del muón.
3. Caracterizar el detector revisando el voltaje y umbral para la adquisición de datos.

Al respecto del primer objetivo, se revisaron los tiempos de coincidencias entre las placas y se exploraron las distintas configuraciones disponibles sobre condiciones que deben cumplirse (estas condiciones son llamadas trigger), para considerar que dos o más placas registran una medición (coincidencias). Una vez conocido este comportamiento, se ajustó para poder observar la vida media del muón, que es el segundo objetivo. A continuación se describen algunos detalles sobre la configuración óptima encontrada.

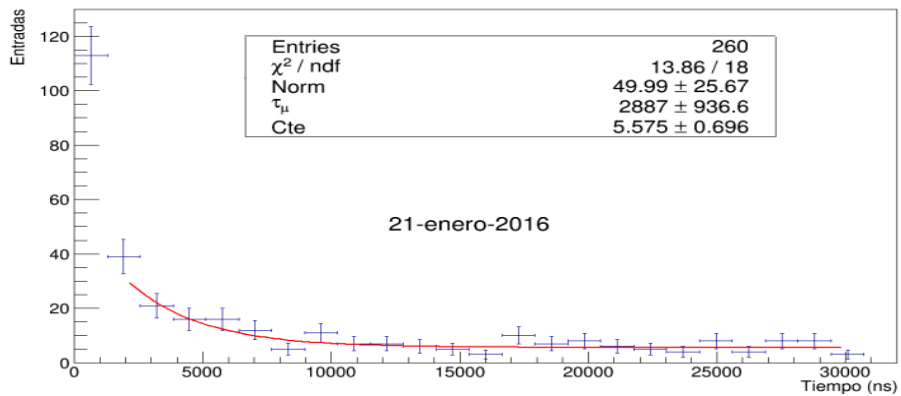
La tarjeta Quarknet cuenta con una ventana temporal ajustable, llamada **veto**, que permite configurar alguna condición entre dos canales o más placas. Cuando se activa el veto, la diferencia entre las placas no es significativa hasta aproximadamente los 7000 ns. A partir de ese tiempo las mediciones de las placas 0 y 2 se separan significativamente de las de la 1. Esto se debe a que el tiempo promedio de decaimiento del muón está en los primeros 2300 ns, entonces se miden coincidencias entre 0 y 1 y conteos aleatorios en 2, posteriormente no se espera que haya dobles coincidencias significativas entre 0 y 1, y lo que mide 2 sigue siendo aleatorio [22].

En la medición **sin veto** se reportó que el conteo entre las 3 placas es parecido hasta los 2500 ns aproximadamente. Después las mediciones de las placas 0 y 2 se separan de las de la placa 1. Se encontró que, para un umbral de -10 mV, el comportamiento de la placa 1 sin veto es extremadamente impredecible en comparación con el de las otras dos placas. Con esta configuración se calcula el decaimiento del muón, para ello se elabora un histograma usando el lenguaje de programación ROOT [22]. Los resultados que se obtuvieron se encuentran en la figura 2.7.

Para mejorar la precisión del instrumento, es necesario encontrar tanto el umbral como la tensión de funcionamiento óptimas. El detector se sometió a una variación del umbral de entre -25 mV y -60 mV, en la figura 2.8 se aprecian los resultados que se obtuvieron. La tensión óptima será aquella en la cual las dobles coincidencias no dependan de la tensión de polarización, ya que no se verá afectada por los cambios de voltaje que puedan ocurrir, lo cual corresponde a la aparición de un plateau o región plana en la gráfica (a 29 V) [22]. Los resultados se obtuvieron



(a) Con veto



(b) Sin veto

Figura 2.7: Decaimiento del muón. El eje horizontal indica la diferencia de tiempos entre los triggers sucesivos en unidades de nanosegundos, las barras de error corresponden al error estadístico. Para ambas gráficas se tomaron aquellos eventos en los cuales se genera un pulso o impacto en la placa A y luego 1 o más pulsos en las placas B y C. La vida media del muón corresponde al parámetro τ_μ de los recuadros [22].

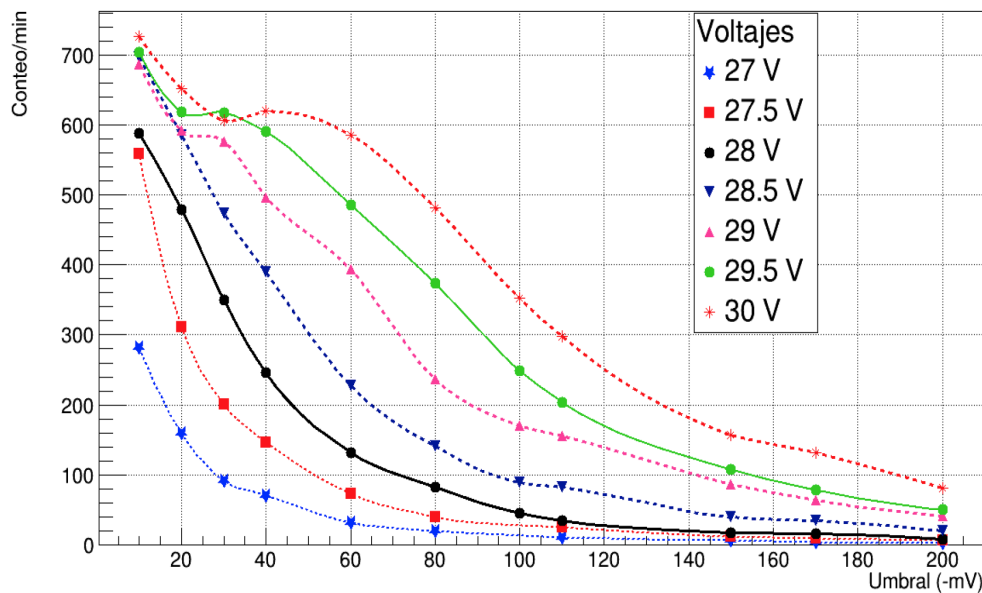


Figura 2.8: Frecuencia vs Umbral, cada línea es la tensión usada en cada caso [22].

modificando el umbral y la tensión de polarización para alcanzar un valor entre 10 Hz y 11 Hz para el flujo de muones en un día. Se encontró que el umbral óptimo está entre -20 mV y -60 mV, y la tensión de polarización óptima es de 29 V donde el número de coincidencias dobles es independiente de la tensión. Para mayor información se puede consultar [22].

2.2.2. Medición del flujo de Muones en función de la altura

El objetivo de esta medición fue observar la cantidad de muones atmosféricos que llegan a la superficie terrestre conforme varía la altura con respecto al nivel del mar del lugar en el que se realiza la toma de datos, es decir, se visitaron varias locaciones como trabajo de campo. Se colocó el detector Escaramujo en el porta equipajes de una camioneta y se llevó un dispositivo que permitía tomar energía eléctrica de la batería del vehículo. La configuración de las placas fue la siguiente: umbral a 30 mV, tensión variable de 28 V, 28.5 V y 29 V, con una ventana de tiempo de 20 ns; el tiempo promedio de adquisición de datos fue de 5 minutos. El recorrido se realizó desde la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez con las coordenadas latitud 15,74° N, longitud 93° O y altitud de 402.896 m s.n.m hasta llegar a la ciudad de San Cristobal de las Casas, Chiapas, con las coordenadas latitud 17,71° N, longitud 92,61° O, y altitud de 2132.632 m s.n.m [29], la ruta del recorrido se muestra en la figura 2.9 [29].

En la figura 2.10 se muestran los resultados de las mediciones realizadas durante todo el recorrido. La línea roja corresponde a tomas con doble coincidencia, la azul corresponde a triple coincidencia. El número de coincidencias de las tres placas no se muestra debido a una falla ocurrida en la placa A. Aunque la secuencia de puntos de las mediciones fluctúa, se puede observar que se cumple una relación creciente del flujo conforme aumenta la altura, que es lo que se esperaba. Durante el trayecto se iba ajustando el trigger, ya que conforme el flujo aumentaba, el detector se saturaba. Se planea repetir esta medición con las tres placas una vez que la placa A esté reparada. Será necesario usar un trigger que funcione durante toda la medición para reflejar

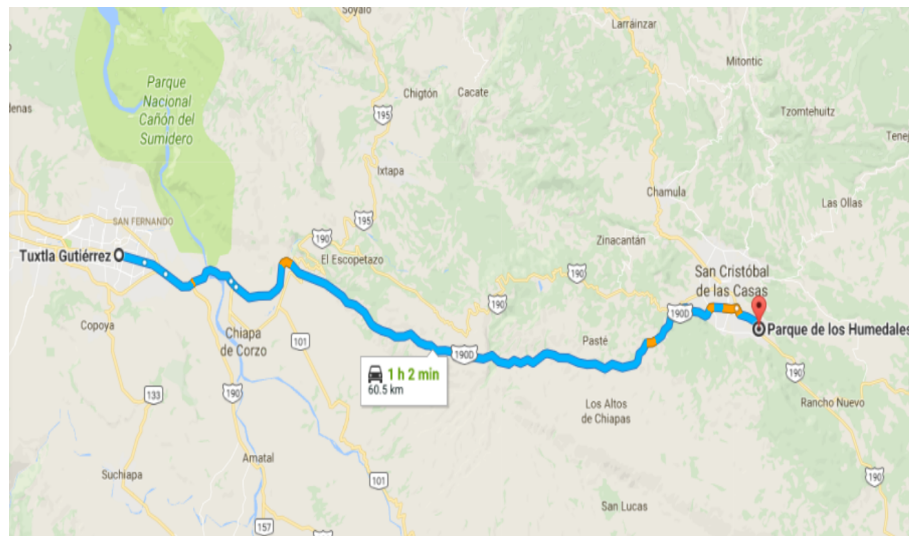


Figura 2.9: La trayectoria que se siguió durante la toma de datos como función de la altitud [29].

con mayor precisión la dependencia del flujo con la altura sin que haya saturación [29].

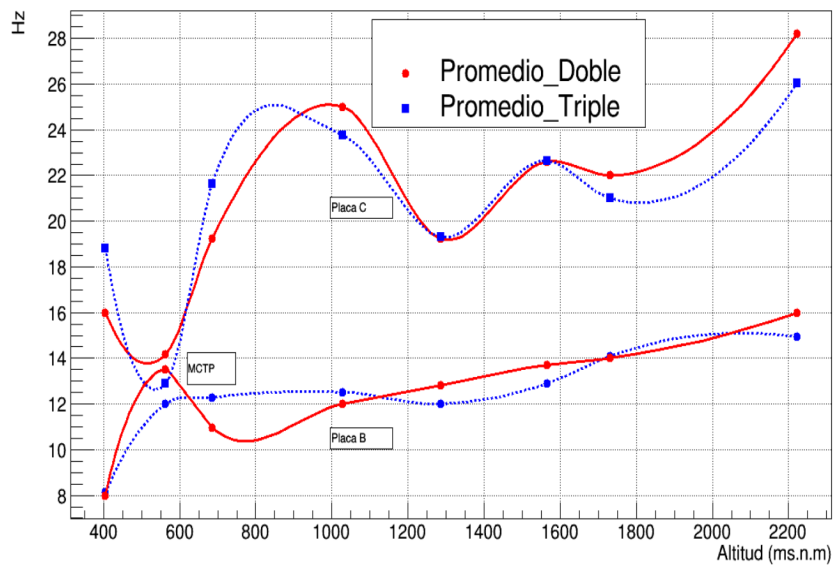


Figura 2.10: Flujo de muones en Hz como función de la altitud para las placas B y C. Las fluctuaciones de la tasa de conteo en la placa C se deben a un fallo durante el traslado y acomodamiento durante el experimento. Sin embargo se puede notar que el flujo crece conforme la altura crece también [29].

Capítulo 3

Variación diurna y atenuación del flujo medidas con Escaramujo

En este capítulo se presenta el análisis de los datos obtenidos con el detector Escaramujo para observar la variación diurna del flujo de partículas con distintas configuraciones de separación entre dos de las placas, para observar también la atenuación de la misma. Las mediciones reportadas se realizaron durante los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2021. El detector se colocó en el tercer piso del edificio B de la FCFM-UNACH.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, una cuenta ocurre cuando una partícula atraviesa ambas placas y deja señal en cada una de ellas (doble coincidencia), si solamente se atraviesa una placa se descarta y no ocurre una cuenta. Se estableció un trigger de 10 mV y una tensión de 27 V para aumentar la estadística, además de una ventana temporal de un minuto (cada minuto se guardan las cuentas y se reinicia el contador) con el veto apagado.

3.1. Observación de la variación diurna

La primera toma de datos se realizó colocando una caja de cartón vacía entre las placas, de tal forma que la separación entre ellas era de 10 cm (ver figura 3.1). Este registro se llevó a cabo del 10 al 18 de Agosto de 2021.

El detector registra las mediciones en un archivo .txt; para el análisis de los datos lo primero que se hace es una búsqueda de las líneas 'ST' y 'DS', pues son éstas las que contienen la información de fecha/hora y número de coincidencias, usando scripts programados en Python. El número de coincidencias se encuentra en el sistema numérico hexadecimal, por lo cual se debe realizar la conversión a decimal. Por último se realiza un filtro para quedarse únicamente con tres columnas: día, hora y número de coincidencias. Esto último es lo que se graficó para poder observar el comportamiento del flujo con respecto al tiempo, tal como se muestra en la figura 3.2.

Haciendo un análisis cualitativo se observa que el flujo presenta una modulación, es decir, varía a lo largo del día, aumentando conforme va avanzando y disminuyendo conforme se acerca el siguiente día. Se observa que al medio día del 11 de agosto se tiene el máximo conteo que está entre $\sim 8,225$ y $\sim 8,400$ cuentas por hora. Mientras que el conteo más bajo fue registrado durante la noche del 13 de agosto, con una magnitud de entre $\sim 7,125$ y $\sim 7,000$ cuentas por hora (contando en orden descendente). Es decir, la máxima variación es de alrededor de

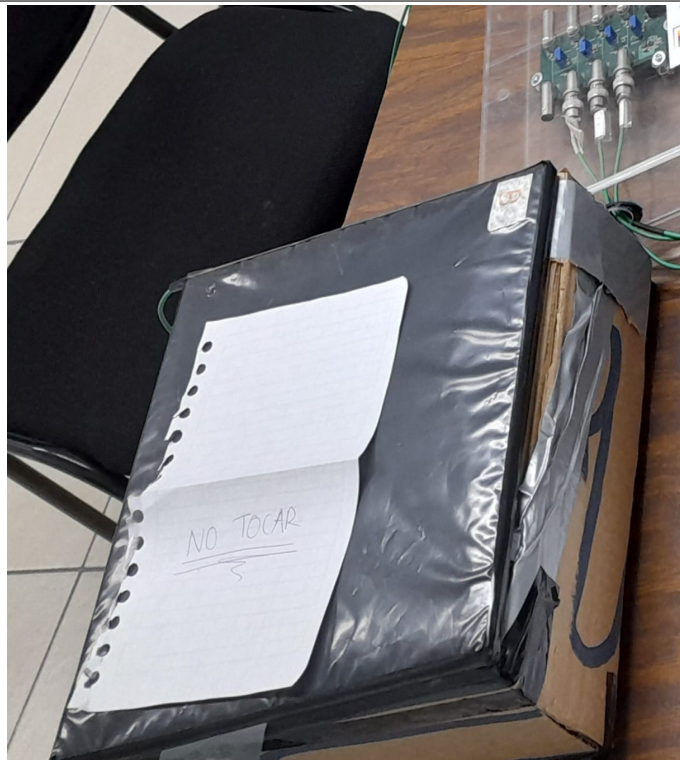


Figura 3.1: Configuración del experimento con separación de 10 cm utilizando una caja con las mismas dimensiones de las placas.

1,400 cuentas por hora. Por lo tanto se observa que existe una variación del flujo de muones atmosféricos, en concordancia con una diferencia entre el día y la noche, registrándose el flujo máximo alrededor del medio día. A este fenómeno se le conoce como “variación diurna”. Éste se debe a la rotación de la Tierra en el ambiente del viento solar, lo que resulta en una variación diaria de la temperatura de la atmósfera; y a los efectos propios de la variación diurna del viento solar magnetizado [30].

3.2. Observación de la atenuación del flujo

Con el propósito de cuantificar una atenuación del flujo de muones detectado por las placas al atravesar algún material denso, se consideró una configuración experimental consistente en separar las dos placas centelladoras poniendo entre ellas ~ 60 cm de concreto (densidad calculada de ~ 2.08 g/cm³). Se usaron 9 blocks sólidos de concreto como se puede observar en la figura 3.3; también una mesa de hierro (densidad de ~ 7.87 g/cm³ [33]) para soportar los blocks (pesan ~ 180 Kg en total) y así poder colocar una de las placas por debajo. Esta configuración agregó una separación de ~ 3 cm de aire (densidad de ~ 0.0012 g/cm³ [34]) entre la segunda placa de Escaramujo y la mesa, y 0.3 cm de hierro de la superficie de la mesa. Considerando las dimensiones del detector, se calcula que el volumen que separa las placas fue de $\sim (56\text{cm} + 3\text{cm} + 0.3\text{cm}) \times (25\text{cm} \times 25\text{cm}) = 37,500$ cm³, que contiene en total una densidad de $\sim 74,277$ g/cm³. Esta medición se llevó a cabo del 19 de agosto al 1 de septiembre de 2021, configurando el detector con los parámetros descritos al inicio del capítulo.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la gráfica 3.4; tal como se esperaba, la cantidad

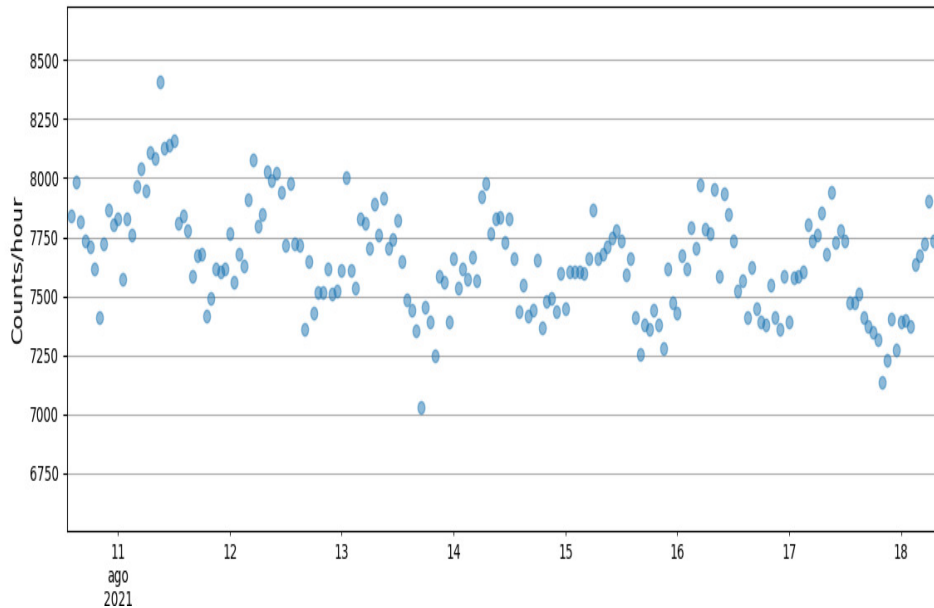


Figura 3.2: Flujo de muones atmosféricos registrado durante el mes de agosto de 2021 usando una separación de 10 cm. En el eje horizontal se tiene el tiempo (días) y en el vertical las cuentas por hora.

de coincidencias que se registra se reduce drásticamente con respecto a la que se obtiene con la separación de 10 cm de aire. Considerando los promedios aproximados de ambas distribuciones, se calcula una disminución del flujo del $\sim 90.2\%$. Cabe destacar que la modulación diurna se sigue observando, ya que haciendo un análisis cualitativo, se tiene que aproximadamente hay 650 coincidencias/hora al inicio del día 19 de agosto, posteriormente se miden 950 coincidencias/hora hacia el medio día, para luego decaer hacia el final del día alrededor de 700 coincidencias/hora, volviendo a aumentar hacia el inicio del día 20 de agosto, donde se nota el mismo comportamiento del día anterior. Esto vuelve a ocurrir claramente del 20 al 21 de agosto, sin embargo se observa una gran dispersión en los días posteriores, esto debido a la disminución de la estadística.

3.3. Mediciones sin separación de las placas

Con el propósito de obtener el valor esperado más alto del flujo de muones atmosféricos con el DE, se realizaron varias mediciones usando las placas en doble coincidencia, en las mismas condiciones que las mediciones anteriores, pero ahora sin separación entre las placas. Los datos que se logren obtener servirán más adelante para realizar correcciones por presión.



Figura 3.3: Arreglo experimental usado para poder separar las placas con un material denso, usando una mesa que pudiera soportar el peso de los blocks de concreto, la columna formada tiene una altura de ~ 60 cm.

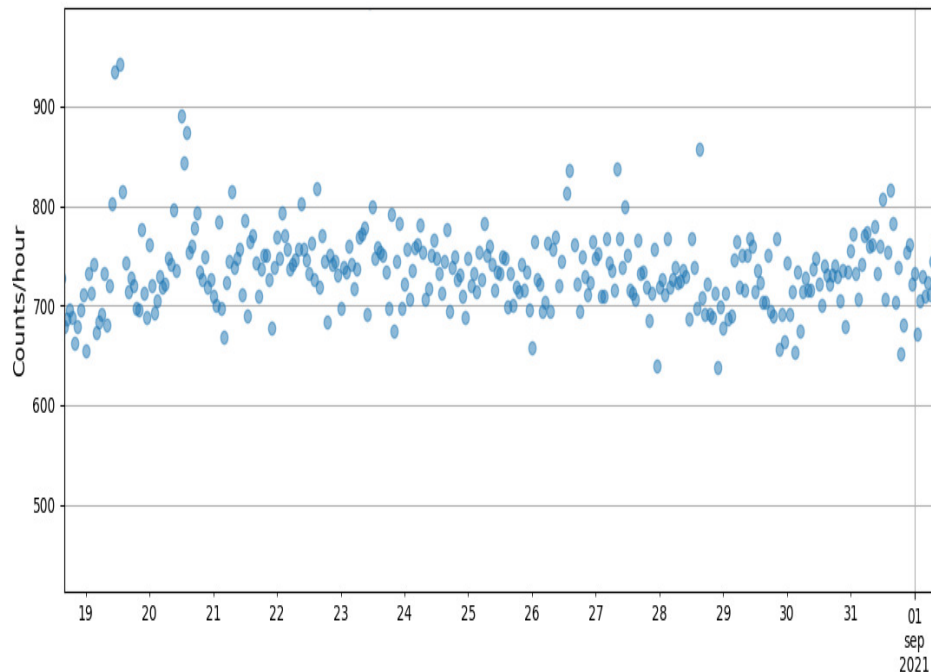


Figura 3.4: Flujo de muones atmosféricos atenuado por un volumen de concreto entre las placas del detector. Se observa una clara disminución del flujo con respecto a la gráfica de la medición realizada con una separación usando aire (figura 3.2). La variación diurna se observa claramente en los primeros días a pesar de la drástica disminución de la estadística.

3.3.1. Mediciones en el mes de octubre

La primera toma de datos se realizó en el periodo del 14 al 23 de octubre de 2021 y se puede ver en la figura 3.5. Se encuentra que persiste la variación diurna. La segunda observación que se encuentra es que el flujo va aumentando de manera continua, sin que se deje de observar la modulación día-noche. Para entender la razón de este aumento hace falta realizar más estudios e investigaciones ya que puede ser desde un efecto por alguna falla electrónica hasta algo provocado por una tormenta geomagnética. La tormenta geomagnética puede hacer que la intensidad del campo magnético de la Tierra baje y entonces, que partículas con rigidez menor a 8.2 GeV's logren llegar a la superficie terrestre, y por lo tanto producir mas secundarios, entre ellos muones [31, 32].

Debido a que no se tuvo conocimiento de algún evento de clima especial, ya sea en el sol o sobre una tormenta geomagnética que estuviera ocurriendo, ni tampoco se sabía de algún defecto en la electrónica, se tomó la decisión de repetir la medición. La toma se hizo del 27 de octubre al 2 de noviembre de 2021, los resultados se pueden ver en la figura 3.6. De nuevo se observa la variación diurna, sin embargo después del tercer día, nuevamente se presentó un aumento gradual los siguientes tres días; esta vez, al final de la toma, el primer día de noviembre, aparentemente se estaba estabilizando. Cabe destacar que existe un gap de 4 días entre la primera medición de octubre y la segunda, durante esos días, aparentemente el flujo volvió al valor inicial de $\sim 14,000$ coincidencias por hora en ambas gráficas; no obstante no se puede llegar a ninguna conclusión.

3.3.2. Mediciones en el mes de noviembre

Se decidió continuar tomando datos durante el mes de noviembre para seguir observando el comportamiento del detector. La toma se realizó del 05 al 28 de noviembre de 2021, el resultado se puede ver en la figura 3.7.

Considerando la gráfica de la toma anterior, se tiene que el máximo tuvo un valor de $\sim 16,500$ coincidencias/hora, al respecto, notamos que en esta nueva toma el número de coincidencias/hora inicia aproximadamente con este mismo valor final de la toma anterior (habiendo tres días en los que no se dispone de datos), pareciendo una continuación. También se observa un incremento lineal hasta el día 11 de noviembre, llegando hasta las $\sim 18,200$ coincidencias/hora, luego de esta subida, las coincidencias empiezan a decrecer alcanzando otro mínimo el día 13 de noviembre. Después hay un nuevo incremento que alcanza aproximadamente $\sim 18,000$ coincidencias/hora hasta el 17 de noviembre, volviendo a decaer el valor hasta alcanzar un mínimo de $\sim 16,500$ el 22 de noviembre. Posteriormente hay de nuevo una subida suave, que alcanza otro máximo de $\sim 17,800$ el 27 de noviembre, volviendo a decaer hasta $\sim 16,800$ coincidencias/hora el 28 de noviembre. Se trata de la toma más larga que se realizó, lo que permite ver la amplitud del rango en el que se mueven las mediciones, que es desde $\sim 16,000$ hasta $\sim 18,200$ coincidencias/hora, es decir, es posible ver que no se presenta solo una subida abrupta como en las mediciones del mes de octubre, sino que se presentan fluctuaciones en un rango amplio. Además es posible todavía observar la variación diurna. No obstante, al igual que con las mediciones anteriores, no se cuenta con información para concluir si este aumento del rango se debe a algún otro evento o actividad referente al clima espacial.

3.3.3. Mediciones en el mes de diciembre

En diciembre se hizo una nueva toma de datos con el objetivo de seguir observando el comportamiento del flujo. Los resultados obtenidos del 01-14 de diciembre, se pueden observar en la figura 3.8; las mediciones no comenzaron inmediatamente después de la medición anterior, de manera que hay un gap de dos días. Sin embargo el flujo inicial observado es muy parecido al último de la medición hecha dos días antes. Otra cosa que se nota es que los primeros cuatro días de la toma se mantiene constante el rango en el que las coincidencias por hora presentan la variación diurna, esto es entre $\sim 16,800$ y $\sim 17,500$ coincidencias/hora. A partir del 05 de diciembre las coincidencias empiezan a bajar de manera lineal hasta el 9 de diciembre, cuando el rango de la variación diurna se vuelve a mantener constante, entre $\sim 15,250$ y $\sim 16,100$ cuentas/hora.

3.3.4. Discusiones sobre los resultados sin separación

- En todas las gráficas se observa la variación diurna, aunque se presentaron aumentos y disminuciones del rango en el que ocurre dicha variación, que todavía no se han entendido, para lo cual se requiere realizar nuevas mediciones e investigar en diversas fuentes reportes sobre posibles eventos de clima espacial ocurridos en las fechas reportadas, que pudieran estar relacionados.

- Para cuantificar la atenuación del flujo observada con la separación por concreto, al respecto del flujo observado sin separación, se consideró la toma realizada en el mes de noviembre, ya que presenta un comportamiento más constante. Se tomó el valor promedio aproximado de los flujos y se obtuvo que el flujo disminuyó en un $\sim 96\%$.
- Con los datos obtenidos en noviembre también se pudo calcular la atenuación que provoca la separación de 10 cm de aire, que es del $\sim 56\%$, con respecto a la medición sin separación.

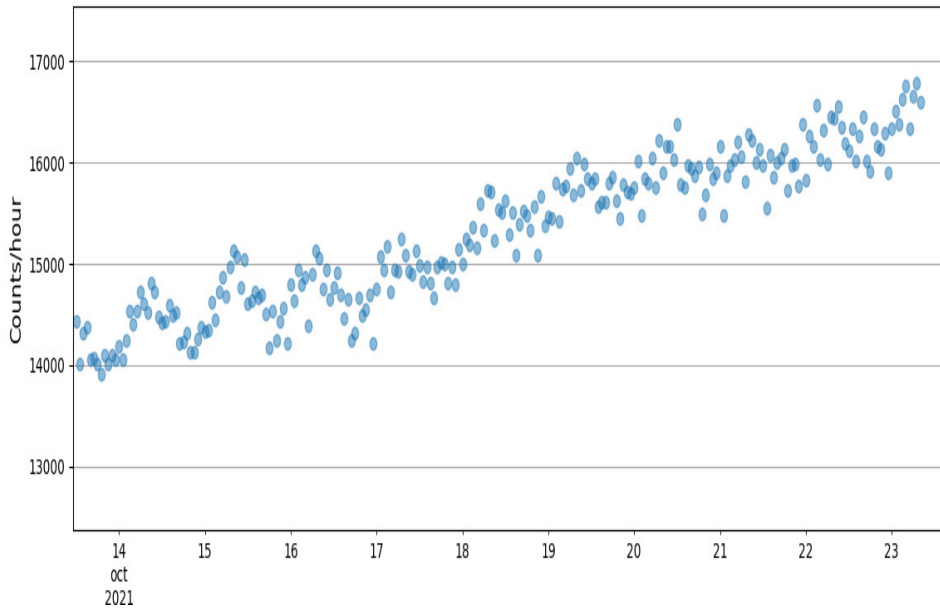


Figura 3.5: Adquisición de datos realizada en el periodo 14-23 del mes de Octubre de 2021 sin separación de placas. Se observa la variación diurna y un aumento gradual del flujo con los días, dicho aumento debe ser investigado con más detalle.

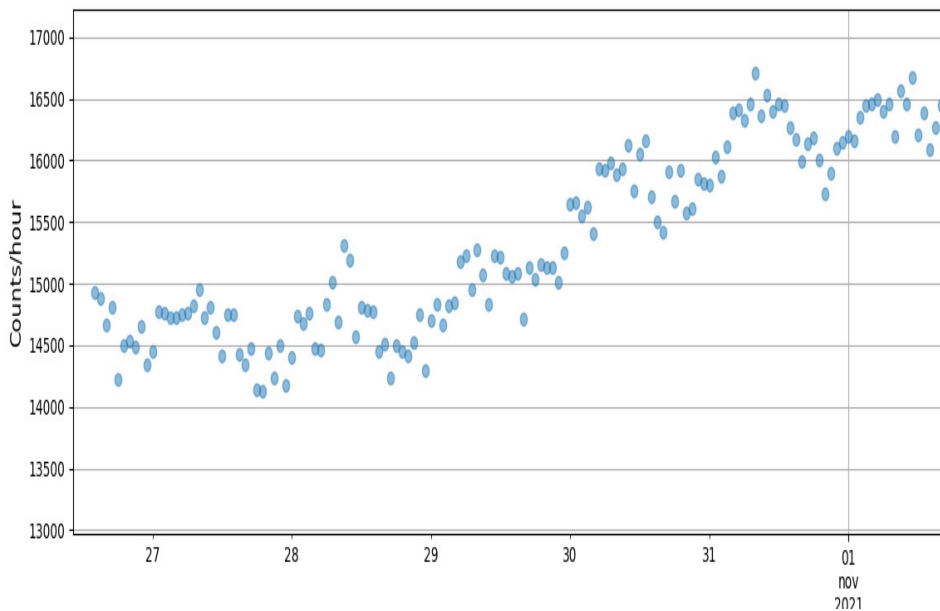


Figura 3.6: Adquisición de datos realizada en el periodo del 27 de octubre al 2 de noviembre de 2021 sin separación de placas. Se observa la variación diurna y un aumento gradual del flujo con los días nuevamente, dicho aumento debe ser investigado con más detalle.

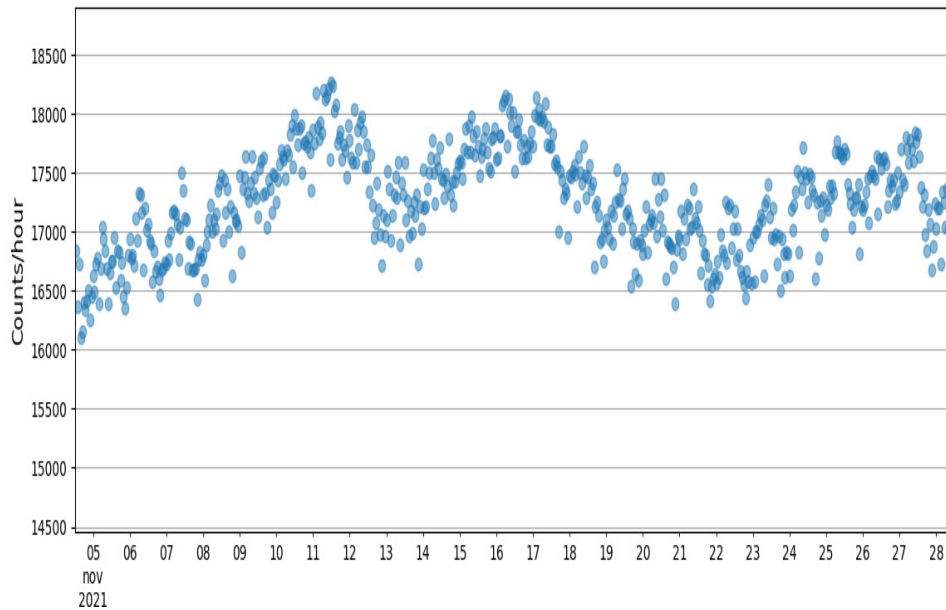


Figura 3.7: Toma de datos de los días 05-28 del mes de noviembre de 2021 sin separación de placas. Se observa un aumento en el rango total de las mediciones.

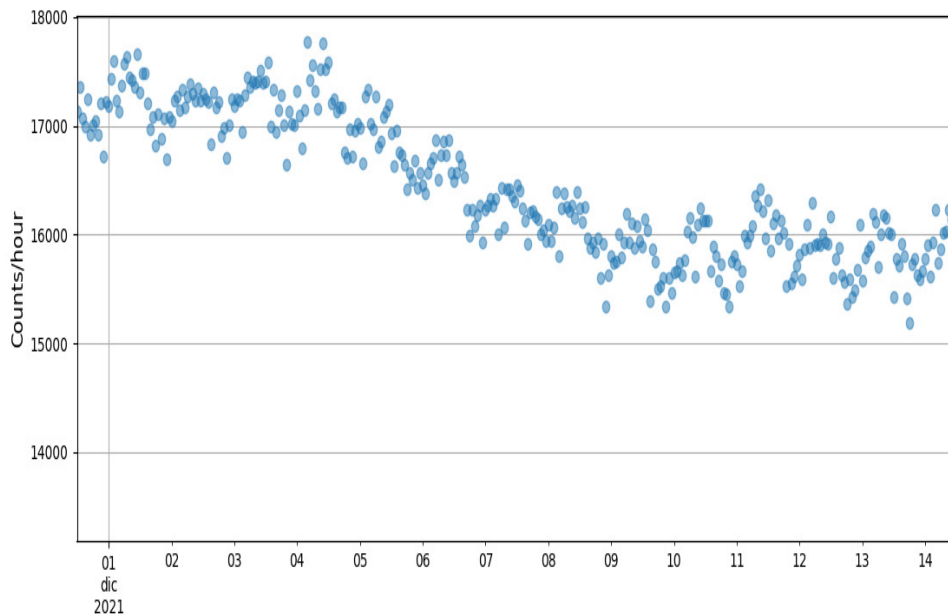


Figura 3.8: Adquisición de datos realizada entre el 01 y el 14 de diciembre de 2021 sin separación entre las placas. Nuevamente se presenta un decrecimiento lineal.

Capítulo 4

Corrección por Presión

Como se mencionó en el capítulo 1, los RC al ingresar a la atmósfera de la Tierra interactúan con los átomos y moléculas que la componen, dando origen a una gran cantidad de partículas secundarias. Estas partículas se absorben más fácilmente con el aumento de la densidad atmosférica pero algunas de ellas llegan a la superficie de la Tierra e incluso pueden penetrar la corteza terrestre, normalmente la componente muónica. Esta última es la componente que mide principalmente el detector Escaramujo. La producción de partículas secundarias se ve altamente influenciada por los cambios en la presión, debido a que ésta provoca cambios en la densidad del aire. Cambios en la presión se verán reflejados en variaciones en la tasa de conteos que registre el detector. Pueden existir variaciones en las tasas de conteo de un monitor de rayos cósmicos o telescopio debido a otros factores meteorológicos como: velocidad del viento, cambios de temperatura en las diferentes estaciones del año, mayor o menor presencia de humedad, y mayor o menor presencia de nieve, entre otros [38]. Es por eso que la corrección por presión es la más importante y debe realizarse en todos los experimentos dedicados a cuestiones referentes a la modulación solar y al clima espacial.

En este capítulo se realizará una primera aproximación de la corrección por presión a los datos que se presentaron en el capítulo anterior. Debido a que los datos de la presión barométrica (PB) no se pudieron obtener del detector Escaramujo, se buscó en otras fuentes que tuvieran datos de la PB, dentro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Esto es debido a que si variamos la altitud los datos de la PB ya no corresponderían a la altitud a la que se realizó la toma de datos. Los datos que se encontraron le pertenecen a la Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN), dichos datos se registran por día y en unidades de milímetros de Mercurio (mmHg) [36].

4.1. Coeficiente por efecto barométrico

A las variaciones de los valores de la tasa de conteo de rayos cósmicos por unidad de tiempo, debido a los cambios de la presión atmosférica, se les conoce como **efecto barométrico** [35]. El comportamiento de la presión es inversamente proporcional a las cuentas de los datos experimentales, es decir, a una mayor cantidad de coincidencias/hora, la presión es baja. Mientras que las variaciones de temperatura en la atmósfera pueden ser pequeñas y despreciables. Una expresión general para el registro de las cuentas como función de la variabilidad de la presión a

una cierta altura está dada por la ecuación

$$N(P) = N(P_0) \exp\left(\int_{P_0}^P \beta(P) dP\right) \quad (4.1)$$

donde P_0 es la presión normalizada al valor de conteo $N(P_0)$.

1. $N(P)$ es el valor de las cuentas a la presión P .
2. $\beta(P)$ es el coeficiente barométrico, usado para realizar correcciones por presión a los registros en las tasas de conteo en cada medición.

El coeficiente barométrico se puede escribir como

$$\beta(P) = \beta(P_0) + \eta_1(P_0)(P - P_0) + \eta_2(P_0)(P - P_0)^2 \quad (4.2)$$

donde η_1 y η_2 son coeficientes constantes. Si $\beta(P) \approx$ constante, entonces la ecuación 4.2 se reduce a la ecuación 4.3.

$$N(P) = N(P_0) e^{\beta(P-P_0)} \quad (4.3)$$

Haciendo una expansión de potencias a la exponencial, obtenemos pequeñas variaciones para la presión y esta expresión la podemos encontrar en la ecuación 4.4

$$N(P) = N(P_0) \left(1 + \beta(P - P_0)\right) \quad (4.4)$$

La ecuación 4.3 se usará para hacer la corrección por presión [35].

4.2. Corrección por presión para un tiempo de tres semanas

En esta sección se usaron los datos de tres semanas del mes de noviembre de 2021, esto debido a que la cantidad de datos que se tienen disponibles de la PB, por parte de SEMAHN, es la más completa para este periodo. Para realizar el análisis de datos, lo primero que se hizo fue ajustar el formato de los datos de Escaramujo a los de la PB, ya que los primeros están registrados por hora mientras que los de la PB están reportados por día. Por lo tanto se tuvieron que realizar modificaciones en los programas de análisis para convertir los eventos a conteos/día, y así poder hacer uso de los datos de la PB disponibles. Adicionalmente, para poder contrastar los resultados con otros trabajos realizados en el área de rayos cósmicos, los datos de la PB se convirtieron de mmHg a mbar, en la tabla 4.1 se presentan las conversiones.

Con los datos de la tabla 4.1 se calcula $\Delta P = P_{i+1} - P_i$, y $\Delta N = N_{i+1} - N_i$. Posteriormente se normaliza el conteo como $\Delta N/N_i = (N_{i+1} - N_i)/N_i$ donde N_{i+1} es el conteo del día siguiente y N_i el conteo del día anterior. El resultado de estas operaciones se muestra en la tabla 4.2.

En la columna de ΔP de la tabla 4.2, aparecen dos números nulos debido a que no se contaba con datos de presión para las fechas correspondientes. Para recuperar los datos de esas filas y así obtener una relación continua, se tomó el promedio del valor de los datos anterior y posterior, obteniendo la tercera columna que aparece en la misma tabla.

Con base en los datos que se obtuvieron en la tabla 4.2 se grafica $\Delta N/N$ contra ΔP y se hace un ajuste lineal. Este ajuste permite determinar el valor del coeficiente barométrico β , el cual corresponde a la pendiente de la recta que se ajusta a los datos. La gráfica sin recuperar los días

Fecha	PB(mmHg)	PB(mbar)	conteo/día
06/11/2021	716	954,58552	404843
07/11/2021	715	953,2523	406184
08/11/2021	720	959,9184	410313
09/11/2021	717	955,91874	417013
10/11/2021	712	949,25264	424259
11/11/2021	709	945,25298	429990
12/11/2021	714	951,91908	419440
13/11/2021	715	953,2523	413123
14/11/2021	716	954,58552	419159
15/11/2021	716	954,58552	425210
16/11/2021	713	950,58586	427895
17/11/2021	711	947,91942	424353
18/11/2021	712	949,25264	415499
19/11/2021	714	951,91908	409382
20/11/2021	713	950,58586	407980
21/11/2021	712	949,25264	405973
22/11/2021	714	951,91908	403647
23/11/2021	714	951,91908	406790
24/11/2021	714	951,91908	413471
25/11/2021	713	950,58586	417514
26/11/2021	714	951,91908	417856
27/11/2021	712	949,25264	417949

Cuadro 4.1: Datos de la PB(mmHg) de la SEMAHN [36], así como su conversión a mbar y el conteo/día.

Fecha	$(\Delta N)/N$	ΔP (mbar)	ΔP (mbar) recuperada
06/11/2021	0,01091534249	2,66644	2,66644
07/11/2021	0,003301459437	-1,33322	-1,33322
08/11/2021	0,01006304943	6,6661	6,6661
09/11/2021	0,0160666454	-3,99966	-3,99966
10/11/2021	0,01707918983	-6,6661	-6,6661
11/11/2021	0,01332821694	-3,99966	-3,99966
12/11/2021	-0,0251525844	6,6661	6,6661
13/11/2021	-0,01529084558	1,33322	1,33322
15/11/2021	0,02842595423	1,33322	1,33322
16/11/2021	0,00627490389	-3,99966	-3,99966
17/11/2021	-0,00834682446	-2,66644	-2,66644
18/11/2021	-0,02130931723	1,33322	1,33322
19/11/2021	-0,01494203458	2,66644	2,66644
20/11/2021	-0,003436442963	-1,33322	-1,33322
21/11/2021	-0,00494367852	-1,33322	-1,33322
22/11/2021	-0,005762460764	2,66644	2,66644
23/11/2021	0,007726345289	0	0,66661
24/11/2021	0,01615832791	0	-0,333305
25/11/2021	0,009683507619	-1,33322	-1,33322
26/11/2021	0,000818463777	1,33322	1,33322
27/11/2021	0,0002225151873	-2,66644	-2,66644

Cuadro 4.2: Normalización de los datos de conteo/día, presión en mbar y la presión en mbar con los datos recuperados, es decir, para los días en los que no se cuenta con información sobre la presión, se toma el promedio de los datos anterior y posterior a los mismos.

en los que no se cuenta con información sobre la presión se observa en la figura 4.1, en este caso el ajuste lineal para encontrar el coeficiente barométrico da un valor de $\beta = -3.65 \times 10^{-4}$. El diagrama con los valores de la presión recuperados se muestra en la figura 4.2; se observa que el valor de β obtenido es el mismo.

Por lo tanto, el valor $\beta = -3.65 \times 10^{-4}$ es el que se utiliza en la ecuación 4.3 para efectuar la corrección por presión. Los resultados tras aplicar la ecuación se muestran en la tabla 4.3; se observa el efecto de la corrección en una ligera variación de los datos de conteo/día.

Fecha	conteo/día sin corrección de presión	conteo/día con corrección de presión
06/11/2021	400424	399855,3166
07/11/2021	404843	405130,7862
08/11/2021	406184	404743,3763
09/11/2021	410313	411188,646
10/11/2021	417013	418497,2956
11/11/2021	424259	425164,408
12/11/2021	429990	428464,943
13/11/2021	419440	419142,0492
15/11/2021	413123	412829,5365
16/11/2021	425210	426117,4376
17/11/2021	427895	428503,5621
18/11/2021	424353	424051,5592
19/11/2021	415499	414908,907
20/11/2021	409382	409673,0128
21/11/2021	407980	408270,0162
22/11/2021	405973	405396,4359
23/11/2021	403647	403647
24/11/2021	406790	406790
25/11/2021	413471	413764,9195
26/11/2021	417514	417217,4173
27/11/2021	417856	418450,28441

Cuadro 4.3: Datos de conteo/día sin corrección por presión y datos corregidos.

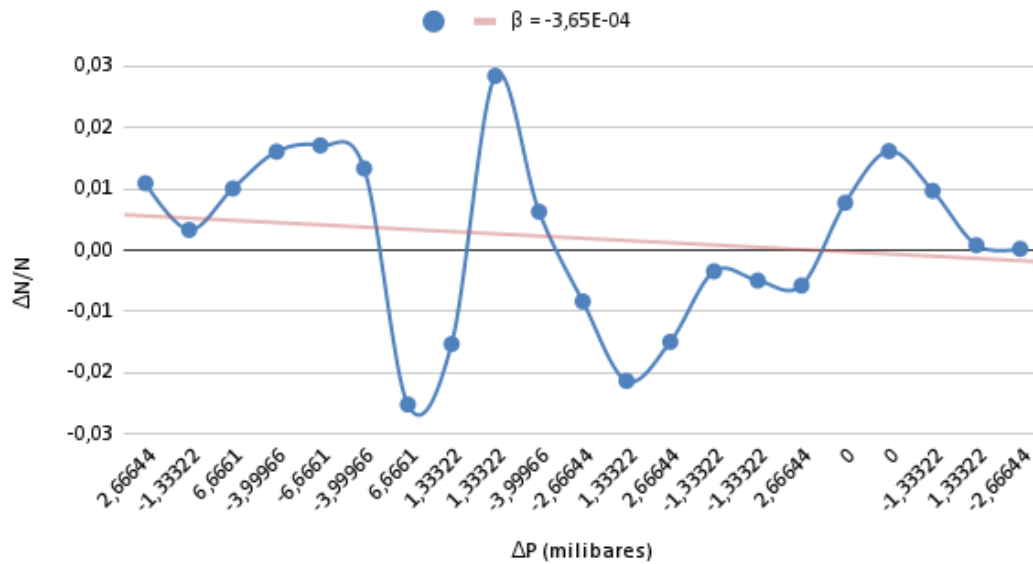
$\Delta N/N$ vs ΔP (Milibares) 06-27 Noviembre 2021.

Figura 4.1: Tasa de conteo normalizada vs variación en la presión, con los valores nulos.

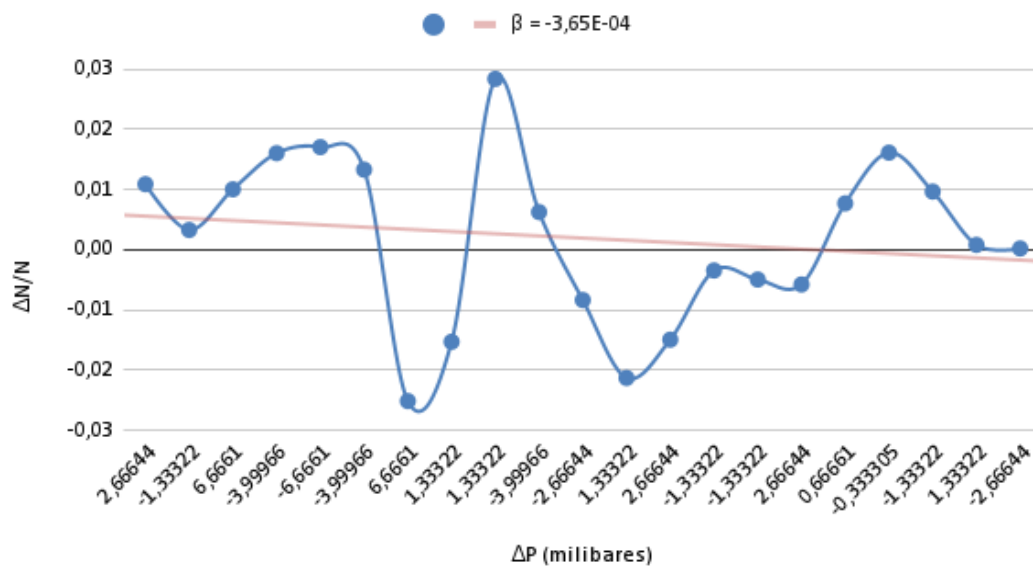
 $\Delta N/N$ vs ΔP (Milibares) 06-27 Noviembre 2021.

Figura 4.2: Tasa de conteo normalizada vs variación en la presión usando los valores recuperados de la misma.

Las gráficas de los datos con corrección por presión (línea azul) y sin ella (línea roja) se muestran en la figura 4.3, donde se observa una ligera diferencia entre ambas. A pesar de tener muy pocos datos de presión se nota que el flujo de partículas sí se ve influenciado por los efectos atmosféricos. Se puede notar que desde el 07-12 de noviembre los efectos atmosféricos afectan la cantidad de partículas que alcanzan a llegar al detector, para luego no tener impacto hasta el 16-17 de noviembre cuando se incrementa levemente el conteo por la corrección por presión, posteriormente ambas distribuciones se acoplan casi sin modificarse.

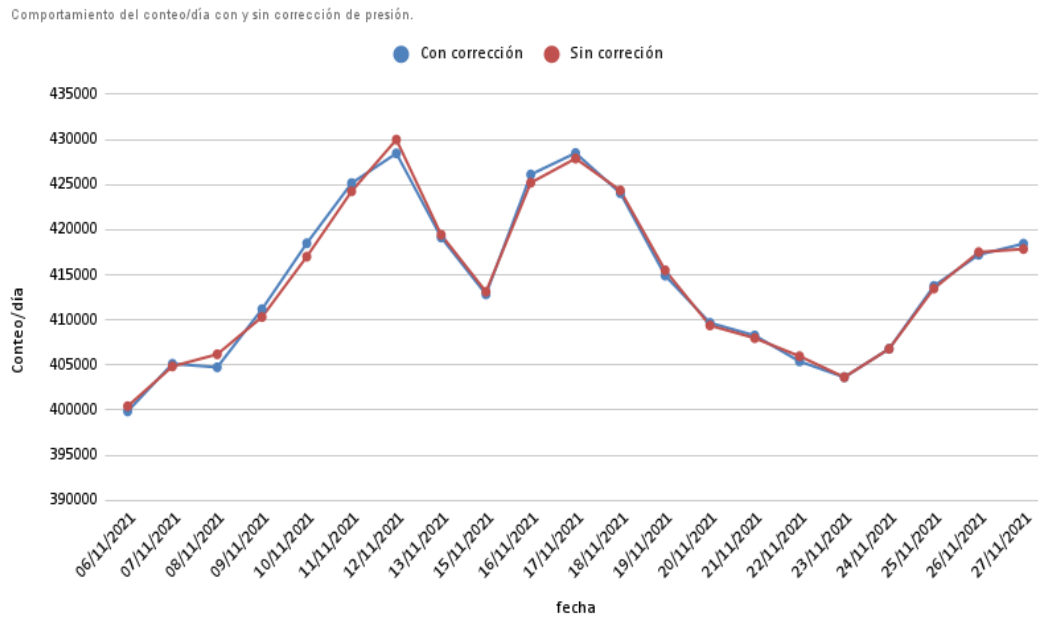


Figura 4.3: Tasa de conteo/día, la línea roja indica el conteo/día sin corrección de presión y la línea azul indica el conteo/día que tiene corrección por presión.

4.3. Corrección por presión para un tiempo de mes y medio

En esta sección se combinaron todos los datos disponibles con el detector Escaramujo, correspondientes a dos días de octubre, tres semanas de noviembre y dos semanas de diciembre de 2021. Esto con el objetivo de tener más estadística para observar los efectos de la atmósfera en el conteo/día. En la tabla 4.4 se muestran los datos disponibles de PB, descartando los días cuando no se cuenta con información.

Se calcula el coeficiente barométrico tal como se describió en la sección anterior, usando la tabla 4.5. Nótese que en dicha tabla se toman en cuenta los días en los que no se contaba con información sobre la presión, considerando en su lugar el promedio del valor de los datos anterior y posterior respectivamente, tal como se describió en la sección anterior, la cuarta columna de la tabla muestra los datos recuperados de esta manera 4.5.

En la figura 4.4 se muestra la gráfica de la tasa de conteo normalizada vs variación en la presión considerando los días en los cuales no se contaba con información sobre la presión. Cuando se realiza la correlación lineal de los datos se obtiene el coeficiente barométrico $\beta = -5.33 \times 10^{-4}$.

Fecha	PB(mmHg)	PB(mbar)	Conteo/día
30/10/2021	712	949,25264	378598
31/10/2021	711	947,91942	388915
01/11/2021	712	949,25264	325136
05/11/2021	714	951,91908	400424
06/11/2021	716	954,58552	404843
07/11/2021	715	953,2523	406184
08/11/2021	720	959,9184	410313
09/11/2021	717	955,91874	417013
10/11/2021	712	949,25264	424259
11/11/2021	709	945,25298	429990
12/11/2021	714	951,91908	419440
13/11/2021	715	953,2523	413123
15/11/2021	716	954,58552	425210
16/11/2021	713	950,58586	427895
17/11/2021	711	947,91942	424353
18/11/2021	712	949,25264	415499
19/11/2021	714	951,91908	409382
20/11/2021	713	950,58586	407980
21/11/2021	712	949,25264	405973
22/11/2021	714	951,91908	403647
23/11/2021	714	951,91908	406790
24/11/2021	714	951,91908	413471
25/11/2021	713	950,58586	417514
26/11/2021	714	951,91908	417856
27/11/2021	712	949,25264	417949
01/12/2021	716	954,58552	414238
02/12/2021	715	953,2523	412118
03/12/2021	714	951,91908	413276
04/12/2021	713	950,58586	413005
05/12/2021	711	947,91942	404399
06/12/2021	711	947,91942	395782
07/12/2021	709	945,25298	389269
08/12/2021	708	943,91976	384879
09/12/2021	707	942,58654	379254
10/12/2021	707	942,58654	379413
11/12/2021	707	942,58654	383027
12/12/2021	712	949,25264	379363
13/12/2021	716	954,58552	379109
14/12/2021	717	955,91874	379201

Cuadro 4.4: Datos disponibles para todas las mediciones realizadas con Escaramujo de los meses de octubre, noviembre y diciembre.

Fecha	$(\Delta N)/N$	ΔP (mbar)	ΔP (mbar) recuperada
30/10/2021	0,04747251702	1,33322	1,33322
31/10/2021	0,02652764743	-1,33322	-1,33322
01/11/2021	-0,1961609911	1,33322	1,33322
05/11/2021	0,1880206981	2,66644	2,66644
06/11/2021	0,01091534249	2,66644	2,66644
07/11/2021	0,003301459437	-1,33322	-1,33322
08/11/2021	0,01006304943	6,6661	6,6661
09/11/2021	0,0160666454	-3,99966	-3,99966
10/11/2021	0,01707918983	-6,6661	-6,6661
11/11/2021	0,01332821694	-3,99966	-3,99966
12/11/2021	-0,0251525844	6,6661	6,6661
13/11/2021	-0,01529084558	1,33322	1,33322
15/11/2021	0,02842595423	1,33322	1,33322
16/11/2021	0,00627490389	-3,99966	-3,99966
17/11/2021	-0,00834682446	-2,66644	-2,66644
18/11/2021	-0,02130931723	1,33322	1,33322
19/11/2021	-0,01494203458	2,66644	2,66644
20/11/2021	-0,003436442963	-1,33322	-1,33322
21/11/2021	-0,00494367852	-1,33322	-1,33322
22/11/2021	-0,005762460764	2,66644	2,66644
23/11/2021	0,007726345289	0	0,66661
24/11/2021	0,01615832791	0	-0,333305
25/11/2021	0,009683507619	-1,33322	-1,33322
26/11/2021	0,000818463777	1,33322	1,33322
27/11/2021	0,0002225151873	-2,66644	-2,66644
01/12/2021	-0,008958617993	5,33288	5,33288
02/12/2021	-0,005144157741	-1,33322	-1,33322
03/12/2021	0,002802001568	-1,33322	-1,33322
04/12/2021	-0,0006561663902	-1,33322	-1,33322
05/12/2021	-0,02128096261	-2,66644	-2,66644
06/12/2021	-0,02177208665	0	-2,66644
07/12/2021	-0,01673136058	-2,66644	-2,66644
08/12/2021	-0,0114061822	-1,33322	-1,33322
09/12/2021	-0,01483174864	-1,33322	-1,33322
10/12/2021	0,000419068403	0	2,66644
11/12/2021	0,009435366175	0	4,66627
12/12/2021	-0,009658295617	6,6661	6,6661
13/12/2021	-0,0006699920076	5,33288	5,33288
14/12/2021	0,0002426153939	1,33322	1,33322

Cuadro 4.5: Datos normalizados de conteo/día, presión en mbar y presión con datos recuperados.

En la figura 4.5 se muestra la misma gráfica pero ahora considerando los valores recuperados de la presión; de la correlación lineal de los datos se obtiene el coeficiente barométrico $\beta = -5.33 \times 10^{-4}$. Es decir, independientemente de la recuperación que se realizó en la presión, el coeficiente barométrico no se alteró.

Considerando de nuevo la ecuación 4.3 con $\beta = -5.33 \times 10^{-4}$, se aplica la corrección por presión a la tabla que contiene los datos recuperados de la presión, el resultado se muestra en la tabla 4.6.

En la figura 4.6 se presentan las gráficas correspondientes, se observa una ligera diferencia entre ambas distribuciones en el periodo del 07-12 de noviembre y del 16-17 de noviembre (que ya se habían observado en la sección anterior), además hay otra diferencia en los días 01-02 de diciembre y finalmente del 12-14 de diciembre se nota un ligero cambio en los conteos.

Notemos que en las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5 hay dos datos que tienen valores muy grandes respecto a los demás, es decir, no son comparables. Con el objetivo de mejorar el cálculo del coeficiente barométrico, se removieron dichos puntos y se repite el cálculo, las gráficas correspondientes se muestran en las figuras 4.7 y 4.8. Se observa que el valor del coeficiente barométrico ahora es $\beta = -6.71 \times 10^{-4}$, el cual no cambia en el caso en el que se usan los valores recuperados de la presión.

Con el nuevo valor para el coeficiente barométrico se realiza la corrección en la tasa de conteo, la cual se presenta en la tabla 4.7. La comparación entre la distribución corregida y la original se muestra en la gráfica de la figura 4.9, donde se observan con mayor precisión los periodos de la distribución que son sensibles a la presión, habiendo una mejora con respecto a los resultados de la gráfica de la figura 4.6.

Se espera que esta corrección mejore cuando se cuente con datos con mayor resolución sobre la presión. Actualmente ya se cuenta con un sensor que proporciona tanto esta información como la de la temperatura, en el marco del experimento LAGO [37], por lo tanto se podrá repetir el ejercicio en los próximos meses, considerando datos más precisos de la presión.

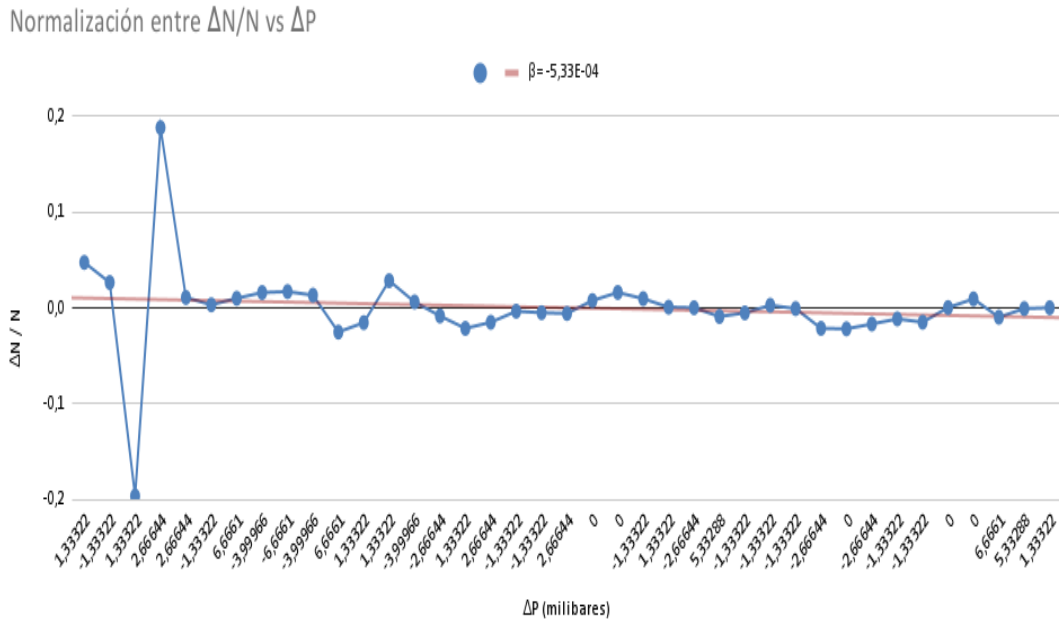


Figura 4.4: Tasa de conteo normalizada vs variación de la presión, con los valores nulos, el coeficiente barométrico es $\beta = -5.33 \times 10^{-4}$.

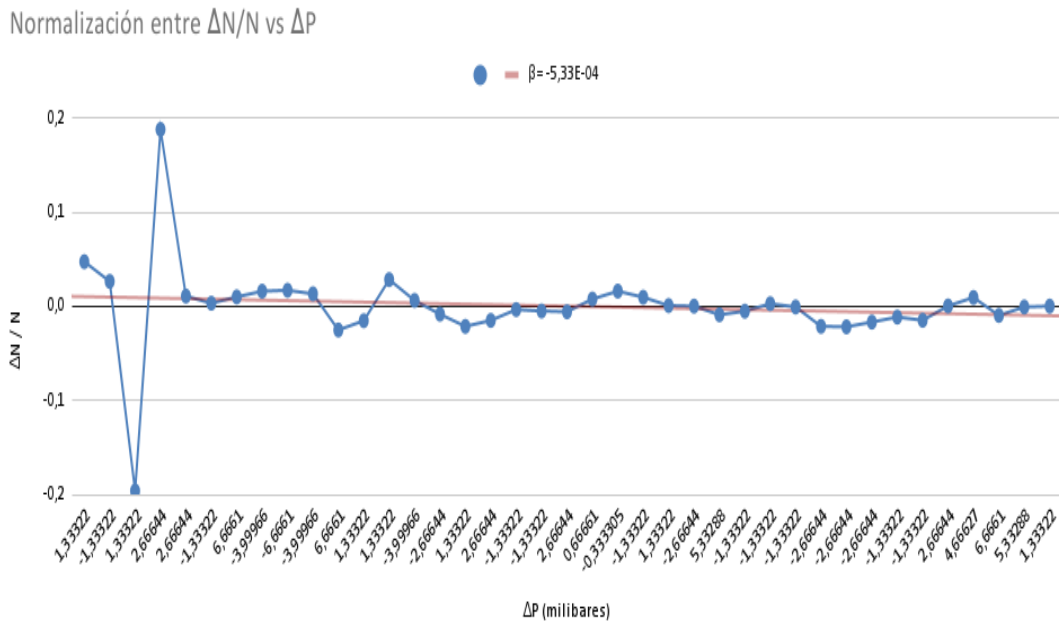


Figura 4.5: Tasa de conteo normalizada vs variación de la presión usando los valores recuperados de la misma, el coeficiente barométrico obtenido es $\beta = -5.33 \times 10^{-4}$.

Fecha	conteo/día sin corrección	conteo/día con corrección
30/10/2021	360625	360368,8286
31/10/2021	378598	378867,1297
01/11/2021	388915	388638,7327
05/11/2021	325136	390510,7217
06/11/2021	400424	399855,3166
07/11/2021	404843	405130,7862
08/11/2021	406184	404743,3763
09/11/2021	410313	411188,646
10/11/2021	417013	418497,2956
11/11/2021	424259	425164,408
12/11/2021	429990	428464,943
13/11/2021	419440	419142,0492
15/11/2021	413123	412829,5365
16/11/2021	425210	426117,4376
17/11/2021	427895	428503,5621
18/11/2021	424353	424051,5592
19/11/2021	415499	414908,907
20/11/2021	409382	409673,0128
21/11/2021	407980	408270,0162
22/11/2021	405973	405396,4359
23/11/2021	403647	403647
24/11/2021	406790	406790
25/11/2021	413471	413764,9195
26/11/2021	417514	417217,4173
27/11/2021	417856	418450,2844
01/12/2021	417949	416762,6981
02/12/2021	414238	414532,4647
03/12/2021	412118	412410,9577
04/12/2021	413276	413569,7809
05/12/2021	413005	413592,3852
06/12/2021	404399	404399
07/12/2021	395782	396344,8902
08/12/2021	389269	389545,7153
09/12/2021	384879	385152,5946
10/12/2021	379254	379254
11/12/2021	379413	379413
12/12/2021	383027	381668,5079
13/12/2021	379363	378286,2202
14/12/2021	379109	378839,6985

Cuadro 4.6: Datos conteo/día sin corrección y con corrección por presión.

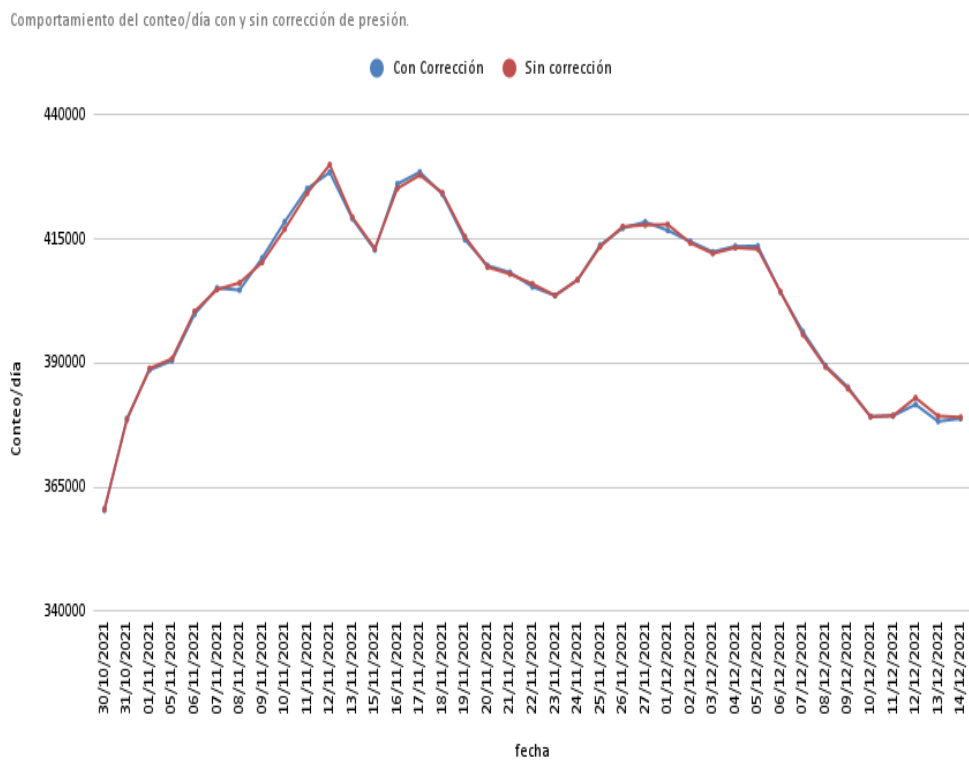


Figura 4.6: Gráfica de conteos/día sin corrección y con corrección de presión.

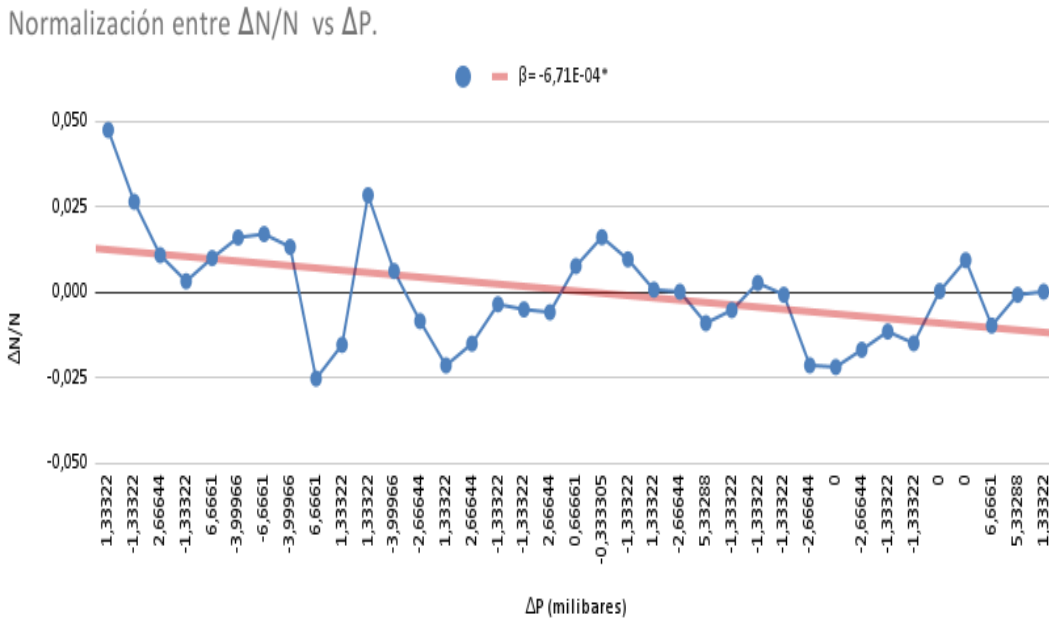


Figura 4.7: Normalización de los Δ conteos/día Vs ΔP , sin corregir los valores de la presión nulos y coeficiente barométrico nos marca $\beta = -6.71 \times 10^{-4}$.

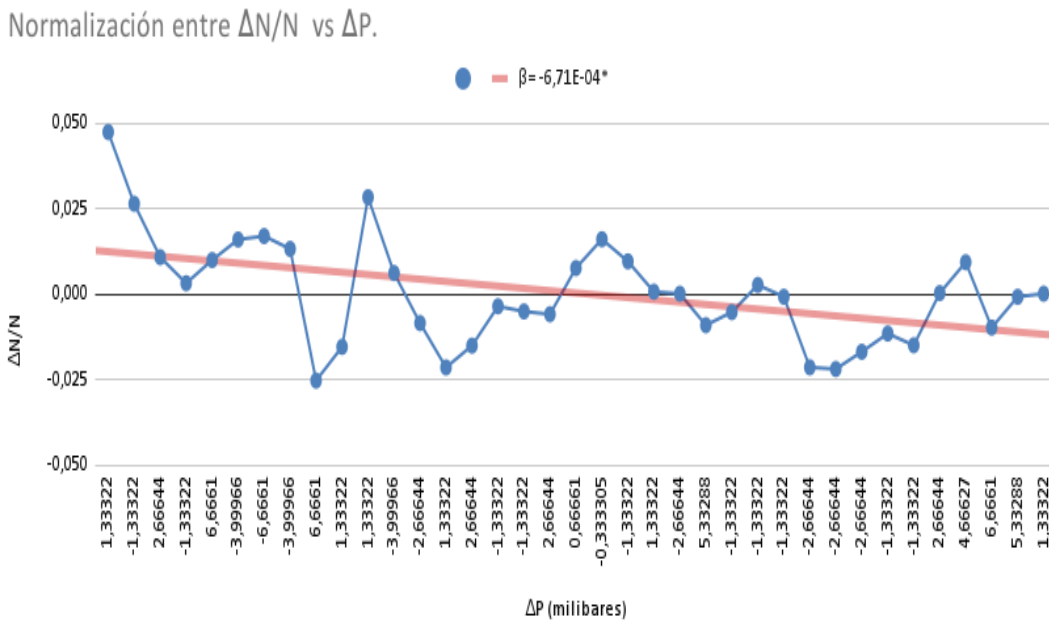


Figura 4.8: Normalización de los Δ conteos/día Vs ΔP , con la corrección de los valores de la presión y coeficiente barométrico nos marca $\beta = -6.71 \times 10^{-4}$.

Fecha	conteo/día sin corrección	conteo/día con corrección
30/10/2021	360625	360302,5325
31/10/2021	378598	378936,8418
01/11/2021	388915	388567,2359
06/11/2021	400424	399708,2094
07/11/2021	404843	405205,3308
08/11/2021	406184	404371,2153
09/11/2021	410313	411415,6655
10/11/2021	417013	418882,4575
11/11/2021	424259	425399,1436
12/11/2021	429990	428070,97
13/11/2021	419440	419064,9407
15/11/2021	413123	412753,5893
16/11/2021	425210	426352,6993
17/11/2021	427895	428661,267
18/11/2021	424353	423973,5475
19/11/2021	415499	414756,2616
20/11/2021	409382	409748,3932
21/11/2021	407980	408345,1384
22/11/2021	405973	405247,2901
23/11/2021	403647	403647
24/11/2021	406790	406790
25/11/2021	413471	413841,0528
26/11/2021	417514	417140,6629
27/11/2021	417856	418604,2893
01/12/2021	417949	416456,0996
02/12/2021	414238	414608,7392
03/12/2021	412118	412486,8419
04/12/2021	413276	413645,8783
05/12/2021	413005	413744,6022
06/12/2021	404399	404399
07/12/2021	395782	396490,7596
08/12/2021	389269	389617,3922
09/12/2021	384879	385223,4632
10/12/2021	379254	379254
11/12/2021	379413	379413
12/12/2021	383027	381317,5642
13/12/2021	379363	378007,9276
14/12/2021	379109	378770,0043

Cuadro 4.7: Datos de conteo/día sin corrección y con corrección

Comportamiento del conteo/día con y sin corrección de presión.

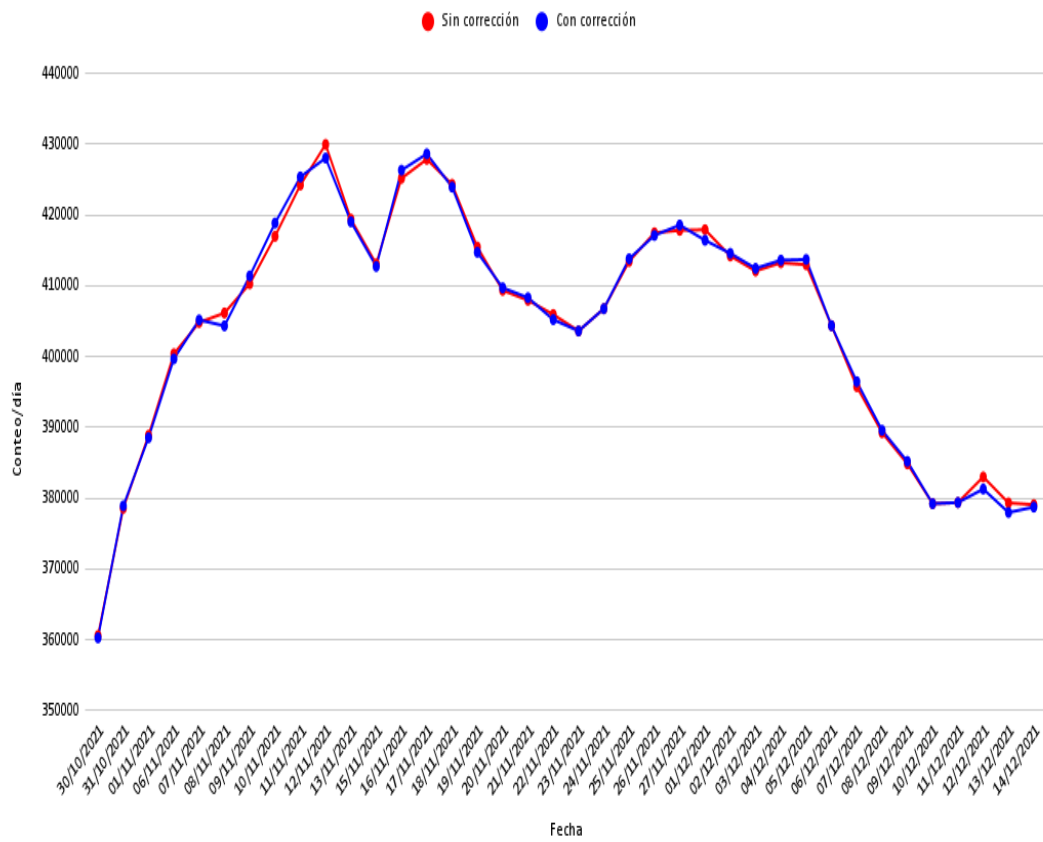


Figura 4.9: Gráfica de conteos/día sin corrección y con corrección de presión.

Capítulo 5

Conclusiones

A partir de las mediciones realizadas en este trabajo, se encontraron los siguientes resultados y conclusiones:

- El detector de centelleo Escaramujo sigue siendo una herramienta fiable que se puede utilizar para tomar datos de partículas secundarias de rayos cósmicos, en especial, la componente muónica.
- El detector de centelleo Escaramujo es capaz de captar la variación o modulación del flujo de partículas que llegan durante el día y durante la noche, tal como se pudo observar en los datos recopilados.
- Se corroboró que la separación de las placas atenúa el flujo de las partículas secundarias detectadas.
- Colocar un material tan denso como el concreto entre las placas, atenúa el flujo de las partículas secundarias con una magnitud del $\sim 96\%$ respecto a la medición sin separación, y del $\sim 90.2\%$ con respecto a la separación con 10 cm de aire. Con los datos obtenidos también se pudo calcular la atenuación que provoca la separación de 10 cm de aire, que es del $\sim 56\%$, con respecto a la medición sin separación.
- Se observó por primera vez, con base en el cálculo del coeficiente barométrico, que la presión afecta el conteo de partículas que llegan a la superficie terrestre. Si bien, esta es una primera aproximación a la corrección por presión, sienta un precedente pues es la primera vez que se calcula el coeficiente barométrico en la localidad, el cual puede ser utilizado para realizar dicha corrección a otros detectores, como el detector de LAGO, JAGUARITO, o el detector de Cámara de Placas Resistivas (RPC).
- Para una mejor estimación del coeficiente barométrico es necesario disponer de un registro continuo de la presión y la temperatura, de por lo menos dos meses de datos, con una resolución temporal de un minuto. Esto permitirá hacer una mejor corrección de los datos por efectos de la presión y nos permitirá observar otros tipos de variaciones como los decrecimientos Forbush [39].
- Perspectivas: es necesario repetir las mediciones considerando una muestra mayor y los datos más precisos de la presión y la temperatura con los que ahora se cuenta en el laboratorio. Esto permitirá conocer mejor el funcionamiento del detector y corregir los efectos

por presión en el flujo medido para obtener mediciones confiables que permitan observar fenómenos físicos que provengan exclusivamente del clima espacial o de la física de partículas.

Bibliografía

- [1] *Masip Manuel (2016). “Los rayos cósmicos las energías más extremas del universo”,* España, RBA.
- [2] <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmic-rays.pdf>
- [3] *Deligny Oliver(2022). The science of ultra-high energy cosmic rays after more than 15 years of operation of the Pierre Auger Observatory, for the Pierre Auger Collaboration 2023.* J. Phys.: Conf. Ser. 2429 012009.
- [4] Solar system exploration.
<https://solarsystem.nasa.gov/resources/925/solar-system-and-beyond-poster-set/>
- [5] *Nagano N, Watson A A. Rev. Mod. Phys. 72, 689 (2000), observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic ray.*
- [6] Astronomy Picture of the Day.
<https://apod.nasa.gov/apod/ap210902.html>
- [7] *Candia Julian (, Propagation of high Energy Galactic Cosmic Ray.* Tesis de doctorado (2004), Universidad Nacional de la Plata.
- [8] *K. Gaisser Thomas, Engel Ralph y Resconi (2016). “Cosmic Rays and Particles physics”,* Cambridge University Press; (2016); Edición 2nd Revised ed.
- [9] *G. Schröder Frank (2019), RP3-News on Cosmic-Ray-Air Shower (Rappouteur talk on CRI).*
- [10] Instituto de Tecnologías en Detección de Astropartículas.
<https://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/28>
- [11] Observatorio de rayos cósmicos.
<https://visitantes.auger.org.ar/>
- [12] Experimento HAWC.
<https://www.hawc-observatory.org/>
- [13] KASCADE.
<https://kcdc.iap.kit.edu/>

- [14] Tunka EAS Cherenkov Light Array.
<http://dbserv.sinp.msu.ru/tunka/>
- [15] AGASA(Akeno Giant Air Shower Array).
<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>
- [16] The Fly's Eye.
<http://www.telescopearray.org/index.php/history/the-fly-s-eye-1981-1993>
- [17] *Tavera Vázquez A. Estudio de la componente múonica en chubascos de partículas, producidos por rayos cósmicos en la atmósfera, usando el experimento KASKADE Grande*, tesis de licenciatura (2010), U.M.S.N.H.
- [18] Centelladores.
<http://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf>
- [19] Science plarform.(2021).Laboratory for liquid scintillation counting.
<https://science.sckcen.be/en/Services/LRM/Scintillation>
- [20] *Alvarez Zavala Roberto. Placa centellador comercial,(noviembre 2013)*. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=5pcgay0wl0c>
- [21] <http://es.escaramujo.net/>
- [22] *Perez Sanchez Luis Rodolfo. Medición de muones atmosféricos usando el detector Escaramujo*. Tesis de licenciatura (2017). Universidad Autónoma de Chiapas.
- [23] *Perez Sanchez Luis Rodolfo, Caballero Mora Karen Salomé. Detector Escaramujo*. Universidad Autónoma de Chiapas (2018). Manual de Escaramujo.
- [24] <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>
- [25] <https://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf>
- [26] C-Series Low Noise, Blue-Sensitive Silicon Photomultipliers DATASHEET.
www.sensl.com
- [27] *Dinu Nicoleta. Silicon photomultiplier (SiPM, National Center for Scientific Reserch (CNRS)*. (2014).
- [28] *Jeff, Glenbrook, Jordan Tomas. "QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User's Manual Series "6000"DAQ"*
- [29] *Lopez Luna Victor M, Perez Sánchez Luis R, Caballero Mora Karen S. Medición del flujo de muones en función de la altitud, utilizando el detector Escaramujo*. Cartel presentado en el CNF (2018).

-
- [30] *K.P. Arunbabu, S. Ahmad et. al.* **Dependence of the muon intensity on the atmospheric temperature measured by the GRAPES-3 experiment.** *Astroparticle Physics* 94 (2017), 22-28.
- [31] *González Méndez, L.X.* **Reporte Rayos Cósmicos 2018-10-11** <https://www.sciesmex.unam.mx/blog/reporte-rayo-csmicos-2018-10-11/>
- [32] *Caballero López, R. y Valdéz-Galicia José Fco.* **Variations in cosmic radiation intensity associated with the barometric effect.** *Geofísica Internacional* (2000), Vol. 39, Num. 1, pp. 135-137.
- [33] http://www.ugr.es/~mota/QGI-Tema7_Relacion_de_problemas.pdf
- [34] <http://users.df.uba.ar/mclaudia/Paleo/Hidrostatica.pdf>
- [35] *Barrantes Salazar Marco Ney de Jesus.* **Determinación de la influencia de los parámetros atmosféricos en el flujo de rayos cósmicos registrado en el TNS de sierra negra, Puebla** (2018), CDMX, UNAM, Tesis de Doctorado.
- [36] SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE
[https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad\\$_\\$saire/datos\\$_\\$historicos](https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad/$_saire/datos$_$historicos)
- [37] <https://lagoproject.net/>
- [38] *Dorman, L.* (2004). **“Cosmic Rays in the Earth’s Atmosphere and Underground”**. Springer science+Business Media, LLC Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1st Edition.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2113-8>
- [39] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/forbush-decrease>