

Astropartículas en el Oriente Colombiano

L. A. Núñez

Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación

Escuela de Física, Facultad de Ciencias,

Agosto 2019

Índice

1. Introducción	2
2. Clima Espacial y herramientas de simulación	3
2.1. Cascadas de Rayos Cósmicos	3
2.2. Rayos cósmicos galácticos y la actividad solar	4
2.3. Campo geomagnético	5
2.4. Herramientas de simulación	5
2.4.1. MagnetoCosmics	6
2.4.2. CORSIKA	6
2.4.3. GEANT4	7
3. Cadena de simulación y modulación solar	7
3.1. La cadena de simulación	8
3.2. Rigidez magnética	9
3.3. Una nueva de rigidez de corte	10
3.4. Condiciones seculares: primarios y secundarios corregidos	12
3.5. Correcciones para condiciones dinámicas	15
4. Impacto y trascendencia	17

Resumen

Presentamos un ensayo sobre algunos resultados preliminares del programa de Clima Espacial del *Latin American Giant Observatory*. Este programa está destinado a realizar un registro detallado de las cascadas de rayos cósmicos desde México hasta la Antártida y se desarrolla a través de una concatenación de simulaciones Monte Carlo que permiten calcular las componentes de las cascadas y conjuntamente con su espectro energía. Una característica clave de estos cálculos es que realizamos las simulaciones detalladas del transporte de radiación en función de la dirección de incidencia, la altitud, latitud y longitud. Cálculos de rigidez magnética y las correcciones para la actividad del campo geomagnético se establecen utilizando el código MAGNETOCOSMICS y la estimación del flujo de secundarios en la superficie se implementa utilizando el código CORSIKA. De esta forma podemos examinar las peculiaridades de cada una de las localidades geográficas.

Para estudiar los efectos de la modulación del campo geomagnético en los flujos de secundarios generalizamos el concepto de Rigidez de Corte y, en vez de una función discontinua construimos una continua basada en una función de probabilidades acumulativas. Esta incorporación nos permite identificar diferencias del flujo que coinciden con los registros de la red mundial de monitores de neutrones.

Como un ejemplo de nuestro esquema de cálculo, presentamos algunos resultados sobre el flujo en secundarios en dos ubicaciones del *Latin American Giant Observatory*: Bucaramanga-Colombia y San Carlos de Bariloche-Argentina, para el período geomagnéticamente activo de mayo 2005

Ha sido casi una década de trabajo que se ha concretado en cerca de una veintena de publicaciones, pero sobre todo, este esfuerzo ha generado una significativa formación de personal plasmada en 11 tesis de pregrado (ocho en Física y tres en Ingeniería Electrónica) y seis de maestría (cuatro en Física y dos en Geofísica).

1. Introducción

Este ensayo, que someto a la consideración del Premio Eloy Valenzuela 2019, está basado en un trabajo culminado recientemente[1], enmarcado dentro de la línea de Astropartículas en el Grupo de Investigaciones en Relatividad y Gravitación .

Para mi, en lo personal, el trabajo de investigación que inspira este ensayo tiene una singular importancia porque resume casi una década de vinculación a la Universidad Industrial de Santander. Constituye el final de una etapa que se enfocaba en generar experiencia tanto en instrumentación como en simulación en Astropartículas y, ahora, inicia el proceso para la aplicación estas técnicas y destrezas en varias líneas de I+D con un significativo impacto social (clima espacial, meteorología, salud ocupacional de tripulaciones y muografía). El trabajo forma parte de la tesis doctoral de Mauricio Suárez-Durán, quien fue mi primer estudiante de pregrado cuando me incorporé a esta Universidad hace casi 10 años. Con Mauricio

construimos la fructífera línea de investigación en Astropartículas que ahora es, sin duda, referencia nacional. Con él recorrimos todas las etapas de su formación, las cuales reflejan el crecimiento de las capacidades de nuestro equipo. Con su tesis de pregrado[2] iniciamos la fase de generar capacidades en instrumentación, con su trabajo de Maestría[3] nos convencimos de la necesidad para desarrollar una experiencia en simulación que complementara nuestros desarrollos de instrumentación. Con esa tesis de maestría comenzó el trabajo centro de este ensayo y que culminó con parte de su trabajo doctoral.

La organización de este ensayo es la siguiente. En la próxima sección generamos un lenguaje común para la discusión de los fenómenos con las herramientas que utilizaremos. Discutimos someramente la Física de las cascadas de rayos cósmicos y cómo éstas se ven moduladas por la actividad solar. Luego, abordamos algunas generalidades referentes al campo geomagnético y culminamos esta sección con una rápida descripción de las herramientas computacionales que utilizaremos. La sección 3 es la central para este escrito. Allí describimos el algoritmo que habremos de seguir para construir una herramienta de alta precisión que nos permita estudiar las modulaciones del flujo de los rayos cósmicos sobre la superficie de la Tierra. Lo presentamos como una cadena de simulaciones que toma en cuenta varios fenómenos de variadas intensidades que ocurren en distintas escalas, tanto espaciales como temporales. Discutimos con detalle nuestra propuesta de una rigidez magnética fundamentada en el concepto de distribución acumulativa de probabilidad. Luego la generalizamos para facilitar el estudio de los efectos geomagnéticos tanto seculares (independientes del tiempo), como transitorios. Completamos esta sección con la comparación de nuestras predicciones con las mediciones realizadas por dos importantes observatorios de rayos cósmicos. Finalmente, en la sección 4 mostramos el impacto y la trascendencia del presente estudio.

2. Clima Espacial y herramientas de simulación

2.1. Cascadas de Rayos Cósmicos

La interacción inicial de un primario¹ con la atmósfera ocurre típicamente entre 10 km y 40 km sobre la superficie terrestre y genera cascadas de partículas secundarias cuya cantidad, en el punto máximo del desarrollo, es proporcional a la energía de ese primario. Estas partículas se distribuyen en tres componentes principales: la componente electromagnética (formada por electrones/positrones e^\pm y fotones γ), la componente muónica (constituida por muones μ^\pm provenientes del decaimiento de mesones cargados, π^\pm y K^\pm), y la componente hadrónica (representada por hadrones, nucleones y algunos núcleos livianos). Las proporciones entre las tres componentes está directamente relacionadas con el tipo de primario que impacta pero, normalmente, la componente electromagnética domina las distribuciones

¹Núcleo atómico proveniente del espacio exterior, que impacta las capas superiores de la atmósfera terrestre

numéricas ($\sim 70\%$) y energéticas ($\sim 85\%$ de la energía del primario se encuentra en esta componente).

El flujo de rayos cósmicos puede ser aproximado por una ley de potencias de la forma $j(E) = j_0 E^{-\alpha(E,Z)}$, donde el exponente espectral, α , dependerá de la energía, E , del primario y de su composición química que se le asocia a su número atómico Z [4]. En general, el flujo de todas las partículas puede ser representado por un exponente espectral $\alpha \sim 3$ en el rango $E \gtrsim 10^9$ eV, es decir, el flujo disminuye un factor 1000 por cada década de aumento en la energía del primario. Para energías en el rango $10 \text{ GeV} < E < 1 \text{ PeV}$, el valor de α se ubica en torno a 2,7, estando dominado por H ($\sim 88\%$), He ($\sim 10\%$) y elementos del grupo $C - N - O$ ($\sim 1\%$) [5]. A energías por debajo de algunos GeV el flujo de partículas está totalmente asociado al viento solar. En este caso la modulación solar puede influenciarlo hasta con energías de algunos cientos de GeV [6, 7]. Por su parte, el efecto del campo geomagnético terrestre –dependiendo de la latitud/longitud del lugar considerado y de la dirección de propagación de las partículas incidentes– se presenta, para energías del orden de 10 GeV, como un corte difuso.

2.2. Rayos cósmicos galácticos y la actividad solar

El estudio del transporte de rayos cósmicos galácticos en la heliósfera se enmarca dentro de lo que se conoce como meteorología espacial (*Space Weather*) y constituye un tópico de gran interés dada su estrecha relación con la identificación de los niveles de radiación en el espacio interplanetario.

Este transporte es modulado por diversos mecanismos físicos los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su extensión y duración. Entre los procesos mas importantes encontramos las variaciones del campo magnético heliosférico y los fenómenos transitorios a gran escala como las eyecciones de masa coronal². Estos procesos involucran períodos de tiempo de varias décadas (dinámica del dínamo solar) hasta de algunas horas, como los producidos por el viento solar (ver por ejemplo [8] y referencias allí mencionadas).

El estudio de la modulación en el flujo de rayos cósmicos provee información sobre el transporte en la heliósfera, tanto interior como exterior, así como de las partículas que ingresan al sistema solar provenientes del medio interestelar [9]. Durante años se ha estado utilizando los llamados monitores de neutrones, que miden el flujo de neutrones en la superficie terrestre. Estos neutrones, con energía típicas de $E_s \gtrsim 10 \text{ MeV}$, resultan de la interacción de rayos cósmicos de energías $E_p \gtrsim 1 \text{ GeV}$ con la atmósfera. La variabilidad temporal del flujo registrado en forma sistemática ha permitido entender diferentes mecanismos como: la marcada anticorrelación entre el flujo de rayos cósmicos y el número de manchas solares [10, 11]; o la modulación con período de 27 días asociada a la rotación del Sol [12].

²Una eyección de masa coronal es una liberación significativa de partículas y campo magnético de la corona solar, que a menudo acompaña a las erupciones solares.

Desde hace unos algunos años, una plétora de sondas analizan el espacio interplanetario y ofrecen datos observacionales *in situ*, que permiten determinar las propiedades locales del viento solar y la distribución del campo magnético heliosférico, y es muy recientemente cuando se han observado directamente los efectos de las eyecciones de masa coronal en la reconexión de las líneas del campo geomagnético[13]

2.3. Campo geomagnético

Se define como campo geomagnético al campo producido por todas las fuentes dentro y fuera de la Tierra hasta la región conocida como magnetopausa, que es la frontera en la cual el campo magnético de la Tierra permanece confinado. Más alláde esta frontera se encuentra el campo magnético interplanetario producido por el Sol y transportado por el viento solar [14].

La intensidad del campo geomagnético (o cualquiera de sus componentes) se mide en nanoteslas, nT, y su intensidad máxima se alcanza cerca a los polos, donde llega a ser del orden de 60000 nT. El de origen interno se asemeja al campo exterior de una esfera uniformemente magnetizada con sus polos separados $\approx 5^\circ$ de los geográficos y el polo Norte ubicado al noroeste de Groenlandia. El campo magnético de origen externo es aquel cuyas fuentes está n por encima de la atmósfera neutra. Estas fuentes son sistemas de corrientes en la ionosfera y la magnetosfera. La intensidad de los campos producidos de esta manera pueden variar fuertemente en el tiempo y, en especial, durante tormentas magnéticas pueden alcanzar 1000 nT en la superficie de la Tierra [15].

El viento solar fluye en el espacio interplanetario a una velocidad supersónica de 500 km s^{-1} e interactúa con el campo geomagnético para formar una región llamada magnetosfera. A unos 15 radios terrestres de ese encuentro, se deflecta y genera un frente de choque, o *bow shock*, donde una fracción sustancial de la energía cinética de las partículas es convertida en energía térmica. El *bow shock* constituye la frontera exterior de la magnetosfera y “detrás” , en la *magnetosheath*, el plasma es más denso, más caliente que el del viento solar y la intensidad del campo magnético es mayor [14].

Las partículas cargadas del viento solar se constituyen en corrientes eléctricas, las cuales producen un campo magnético interplanetario que refuerza y comprime el campo geomagnético en el lado diurno y lo debilita y extiende en el lado nocturno. De este fenómeno de compresión y extensión resulta la cola geomagnética, o magnetocola, que se extiende a grandes distancias más alláde la órbita lunar. La transición entre el campo geomagnético deformado y la *magnetosheath* se llama magnetopausa [15].

2.4. Herramientas de simulación

El centro de nuestro trabajo se centraráen estudiar las modulaciones, por la actividad solar, que sufren los rayos cósmicos que impactan la alta atmósfera terrestre y generan

cascadas de partículas secundarias detectadas sobre la superficie terrestre. Este estudio, que desarrollaremos en la sección 3, se implementa mediante la concatenación de tres códigos computacionales: MagCos, CORSIKA y GEANT4. A continuación explicamos brevemente en qué consisten cada una de estos ambientes de simulación.

2.4.1. MagnetoCosmics

MagnetoCosmics o MagCos [19] es un código basado en GEANT4 [16] que calcula las trayectorias de partículas cargadas que ingresan a la magnetósfera terrestre. Este sistema emplea diferentes modelos de campo geomagnético interno y externo, entre ellos IGRF/DGRF [17], Tsyganenko89, Tsyganenko96 y Tsyganenko2001 [18]. Las principales aplicaciones de MagCos son: el cálculo de direcciones asintóticas de incidencia; el cálculo de la rigidez de corte geomagnético (R_U , R_L y R_C) en función de la posición, dirección y tiempo; y la visualización de las trayectorias de las partículas y las líneas de campo magnético.

Para calcular la trayectoria de un rayo cósmico en el campo geomagnético, se integra numéricamente la ecuación de Lorentz. Para trazar las líneas de campo magnético, se considera una ecuación diferencial adicional que define el movimiento paralelo al campo. MagCos emplea métodos de integración numérica como Euler implícito y explícito, Runge Kutta de tercer y cuarto orden, y KashKarper. Para más información relativa a MagnetoCosmics, se puede consultar [19].

2.4.2. CORSIKA

CORSIKA, COsmic Ray Simulations for KAscade por sus siglas en inglés, es un programa Monte Carlo para la simulación detallada de cascadas atmosféricas extensas iniciadas por rayos cósmicos de alta energía (primarios). Este código fue desarrollado para realizar simulaciones para el experimento KASCADE, el cual fue diseñado para estudiar cascadas atmosféricas iniciadas por primarios de energías entre 3×10^{14} eV y 1×10^{17} eV. Luego fue actualizado a KASCADE-Grande, alcanzando los 10^{18} eV. Protones, núcleos livianos hasta el hierro ($1 \leq Z_p \leq 26$), fotones y muchas otras partículas pueden ser usados como primarios en CORSIKA. Este código permite simular interacciones y decaimientos de primarios y secundarios en la atmósfera hasta energías del orden de 10^{20} eV, proporcionando el tipo, energía, ubicación, dirección y tiempos de llegada de todas las partículas secundarias creadas en una lluvia y que alcanzan un nivel de observación seleccionado.

CORSIKA consta básicamente de cuatro partes. La primera parte se encarga del decaimiento de partículas inestables, y el seguimiento de las partículas teniendo en cuenta pérdidas de energía por ionización y deflexiones debidas a dispersiones múltiples y al campo geomagnético. La segunda y tercera parte simulan las interacciones hadrónicas con los núcleos de aire a altas y bajas energías respectivamente. La cuarta parte describe el transporte y la interacción de electrones, positrones y fotones. Para las interacciones hadrónicas de

alta energía están disponibles los modelos: VENUS, QGSJET, DPMJET, SIBYLL y HDPM. Las interacciones hadrónicas de baja energía pueden ser descritas por las sofisticadas rutinas de interacción GHEISHA o por un modelo más simple, el ISOBAR. Para las interacciones electromagnéticas se puede emplear el programa de cascadas EGS4 o las fórmulas analíticas NKG. CORSIKA también posee opciones para la generación de radiación Cherenkov y neutrinos. Para más información sobre la estructura de CORSIKA y las distintas opciones que ofrece, consultar la referencia [20]

2.4.3. GEANT4

En esta sección, describimos de forma muy resumida, GEANT4 (para GEometry ANd Tracing [16]), una plataforma que simula de forma muy detallada, mediante métodos Monte Carlo la interacción materia y radiación. Lo hacemos por completitud, porque en este trabajo no presentamos los resultados de las simulaciones que dan cuenta de las respuestas de los detectores a las cascadas de partículas secundarias,

GEANT4 es un ambiente de simulación estándar en Física de partículas que se ha popularizado ampliamente y cuenta con importantes aplicaciones en física de alta energía, experimentos nucleares, médicos, aceleradores y estudios de física espacial³. La colaboración internacional GEANT4⁴ se ocupa de su desarrollo, mantenimiento y soporte.

GEANT4 incluye ambientes para manejar geometría, seguimiento de partículas a través de la materia, respuesta del detector, gestión de ejecución, visualización e interfaz de usuario. Para muchas simulaciones físicas, esto significa que se debe dedicar menos tiempo a los detalles de bajo nivel, y los investigadores pueden profundizar en los aspectos más importantes de la simulación.

3. Cadena de simulación y modulación solar

Tal y como lo mencionamos en la sección 2.2, estimar el flujo de partículas secundarias en la superficie terrestre, modulado por la actividad solar, involucra procesos que ocurren en diferentes escalas espaciales y temporales. A continuación esquematizamos la cadena de procesos involucrados [1]:

Flujo de RC	→ Heliosfera	Fujo modulado	→ Magnetosfera	Primarios → ...
... → Primarios	→ Atmósfera	Secundarios	→ Detector	Señales.

Este esquema, que es central para nuestro trabajo y la cadena de simulaciones que a continuación lo replica, considera tres factores importantes: los efectos geomagnéticos, el desarrollo de las cascadas atmosféricas y la respuesta del detector en superficie.

³MagCos, como lo mencionamos anteriormente y que describimos en la sección 2.4.1 es una de esas aplicaciones desarrollada en base a GEANT2

⁴<http://www.GEANT4.org>

3.1. La cadena de simulación

Los procesos que delineamos anteriormente se puede traducir en una concatenación de simulaciones que utiliza herramientas estándares para la comunidad de astropartículas y que discutimos en la sección 2.4. En esta cadena podemos distinguir los siguientes eslabones:

1. la simulación de los efectos del campo geomagnético sobre la propagación de las partículas cargadas, que se caracteriza mediante una nueva definición de la rigidez de corte direccional R_C –cuyo valor discrimina si un primario alcanza o no, una determinada posición geográfica sobre la superficie terrestre– y se calcula mediante el código MagCos [19]. El campo geomagnético viene determinado por el modelo IGRF11 [17] para radios $r < 5R_\oplus$ ⁵ y para $r > 5R_\oplus$ se utiliza el modelo de Tsyganenko versión 2001 [18]. En este punto, hay un par de contribuciones importantes de nuestro trabajo las cuales se incorporan al filtrado de primarios por efecto del campo geomagnético:
 - a) se construye una función de rigidez magnética, $R_m(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, t, \theta, \phi)$, para una posición geográfica⁶ y, seguidamente generalizaremos la función rigidez de corte, R_C , tanto para el caso secular como para los casos dinámicos.
 - b) se calcula entonces el flujo de primarios en la atmósfera superior, $\approx 112\text{km s.n.m}$, filtrado por la función de rigidez magnética, $R_m(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, t, \theta, \phi)$ para la rigidez de corte generalizada correspondiente al punto geográfico particular.

Estas dos contribuciones las desarrollaremos en detalle en la próxima sección.

2. el segundo eslabón consiste en simular el desarrollo corregido de las cascadas de partículas –desde el impacto del primario hasta su llegada a las superficie terrestre– mediante CORSIKA [20].
3. Se completa la cadena con la respuesta del detector al flujo de partículas secundarias que lo impactan. Esta respuesta se simula mediante GEANT4 [16], no la vamos a considerar en este ensayo pero ya ha sido implementada en distintas contribuciones de las cuales participamos en varias [21, 22, 23, 24, 25].

Los resultados de esta cadena de simulaciones han sido validados a través de mediciones experimentales en detectores Cherenkov de agua de las colaboraciones *Latin American Giant*

⁵ r es la distancia del centro de la Tierra y R_\oplus es el radio de la Tierra, que suponemos de 6371 km

⁶latitud (Lat), longitud (Lon) y altitud sobre el nivel del mar (Alt), tiempo (t) y ángulos cenital (θ), azimutal (ϕ).

*Observatory*⁷ (LAGO) y del Observatorio Pierre Auger⁸.

Para desarrollar campañas de cálculos masivos esta cadena de simulaciones se encuentra disponible integrada a la infraestructura del Grid Europeo (*European Grid Infrastructure*, EGI⁹) mediante una organización virtual *lagoproject*, a través de los ambientes Montera [26], GWpilot [27] y GWcloud [28].

En la próxima sección discutiremos, una nueva definición de la función rigidez de corte que hemos incorporado a la cadena de simulaciones y que provee una mayor precisión en el análisis de los fenómenos transitorios que discutimos en la sección 2.2.

3.2. Rigidez magnética

En esta sección, describiremos en detalle una posible redefinición de la región de penumbra para la rigidez magnética y, propondremos un nuevo método para calcularla a partir de una función de probabilidad acumulativa del arribo de partículas a un determinado punto geográfico.

El cambio en la dirección de propagación de un primario, debido a la acción del campo geomagnético $\vec{B}(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, t)$, viene descrito por

$$\frac{d\hat{I}}{ds} = \frac{1}{R_m} \left(\hat{I} \times \vec{B}(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, t) \right), \quad (1)$$

donde $\hat{I} = \vec{v}/|\vec{v}|$ representa la dirección de propagación, s el arco de trayectoria y $R_m = pc/Ze$ la rigidez magnética para una cantidad de movimiento p ; adicionalmente tenemos que c es la velocidad de la luz, Z el número atómico y e es la carga del electrón.

Los valores de la R_m discriminan si una determinada partícula puede arribar a la superficie de la Tierra o quedar atrapada en el campo geomagnético. Entonces, habrá valores *permitidos* y *prohibidos* para R_m . Ese valor se denomina Rigidez de Corte (R_C). Si una partícula cargada tiene $R_m > R_C$, se considera que podrá alcanzar el suelo, mientras que si su $R_m < R_C$, entonces no lo hará [29, 30, 31].

La caracterización de los efectos del campo geomagnético mediante la rigidez magnética se presenta en la figura 1 donde ilustramos –para Bucaramanga y San Carlos de Bariloche– la

⁷LAGO <http://lagoproject.net/> es el observatorio de rayos cósmicos mas extendido del mundo, constituido por una colaboración de ocho países latinoamericanos y España, que concentra 100 investigadores de mas de 30 instituciones. Consiste en una red de detectores Cherenkov de agua de bajo costo, instalados desde el norte de México hasta la Antártida, que cubren alturas desde el nivel del mar hasta casi los 6000m.s.n.m, y se extiende a un amplio margen de rigideces magnéticas.

⁸El Observatorio Pierre Auger <https://www.auger.org/> es el instrumento más grande del mundo para la detección de rayos cósmicos de ultra alta energía. está ubicado en Pampa Amarilla, Malargüe Argentina, cubre una extensión de más de 3000 Km² y es operado por una colaboración de casi 500 investigadores, de 82 instituciones académicas provenientes de 18 países

⁹<http://www.egi.eu>

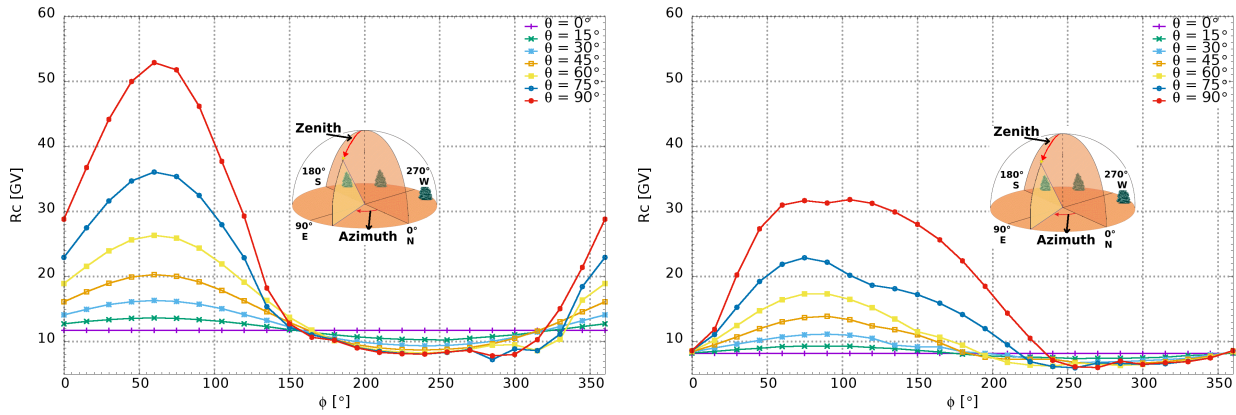


Figura 1: Variación secular de R_C en función del ángulo acimutal, ϕ , para distintos valores del ángulo cenital θ . Fueron calculados en el límite atmosférico superior (112 km a.s.l.) para Bucaramanga Colombia (izquierda) y San carlos de Bariloche en la patagonia argentina (placa derecha). Nótese la marcada diferencia de R_C en ambas ciudades dependiendo de la dirección de incidencia

variación de la rigidez de corte, respecto al ángulo cenital para distintos ángulos azimutales.

Nótese el comportamiento anómalo de la rigidez de corte en Bucaramanga cuando se consideran grandes valores para el ángulo acimutal ($250^\circ \lesssim \phi \lesssim 300^\circ$) y ángulos cenitales ($45^\circ \lesssim \theta \lesssim 90^\circ$). Esta anomalía no se observa para San Carlos de Bariloche y un análisis mas detallado apunta a asociar este comportamiento con las desviaciones que sufren partículas cargadas de baja rigideces al cruzar regiones con elevados gradientes geomagnéticos[3].

3.3. Una nueva de rigidez de corte

Siguiendo el esquema tradicional, tal y como se puede apreciar en la figura 2 izquierda, tendremos tres rangos para los valores de R_m [32]:

- *Prohibida*: va desde cero hasta el primer valor de rigidez permitida R_L ;
- *Permitida*: con valores mayores o iguales a R_U .
- *Penumbra*: es el rango, *difuso*, de valores comprendidos entre R_L y R_U .

Tradicionalmente, la propagación de partículas cargadas a través del campo geomagnético ha buscado comprender cómo cambia la “región de penumbra”, que viene condicionada por

el parámetro R_C definido como

$$R_C = R_U - \sum_{k=R_L}^{R_U} \Delta R_k^{\text{permitido}}, \quad (2)$$

donde ΔR_k es la resolución de para el cálculo de R_m .

Es importante resaltar que la definición (2) supone que todas las trayectorias de partículas contribuyen de manera equitativa en la región de penumbra y, por lo tanto, constituye una aproximación muy burda al complejo problema de las trayectorias iniciales que pueden alcanzar el suelo.

Nosotros hemos refinado esta aproximación –ampliando el concepto de rigidez de corte, mediante una función de probabilidad acumulativa– al considerar la penumbra no como un punto de discontinuidad, sino como una transición relativamente suave, entre lo prohibido y lo permitido. Para ello re-interpretamos la rigidez de corte, R_C , como

$$R_C = R_C(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, \theta, P(R_m(\theta))), \quad (3)$$

donde $P(R_m(\theta))$ es una función de probabilidad acumulativa para un punto con una rigidez magnética determinada, definida por

$$P(R_m(\theta)) = \sum_{R_m=R_{L\min}}^{R_m=R_{U\max}} \wp(R_m(\theta)), \quad (4)$$

y, finalmente la $\wp(R_m(\theta))$ es la función de probabilidad convencional, i.e. la fracción entre el $\#$ eventos permitidos entre $\#$ eventos totales:

$$\wp(R_m(\theta)) = \frac{\#R_{m\text{permitido}}(\theta)}{\#R_{m\text{tot-permitido}}(\theta)}, \quad (5)$$

Nótese que para cada θ , promediamos el ángulo acimutal ϕ , dentro del valor de la penumbra.

Con este esquema, un primario con R_m y ángulo cenital θ que llega al suelo, tendrá una probabilidad $P(R_m(\theta)) = 1$, mientras que si no lo alcanza asumirá $P(R_m(\theta)) = 0$. Por su parte, un primario que se encuentre en la región de penumbra tendrá una probabilidad entre 0 y 1 y para determinarla generamos un número aleatorio $0 < P_{\text{temp}} < 1$, implementando el siguiente algoritmo de Monte Carlo:

- Si $P(R_m(\theta)) \geq P_{\text{temp}}$, entonces $P(R_m(\theta)) = 1$; si no
- Si $P(R_m(\theta)) < P_{\text{temp}}$, entonces $P(R_m(\theta)) = 0$.

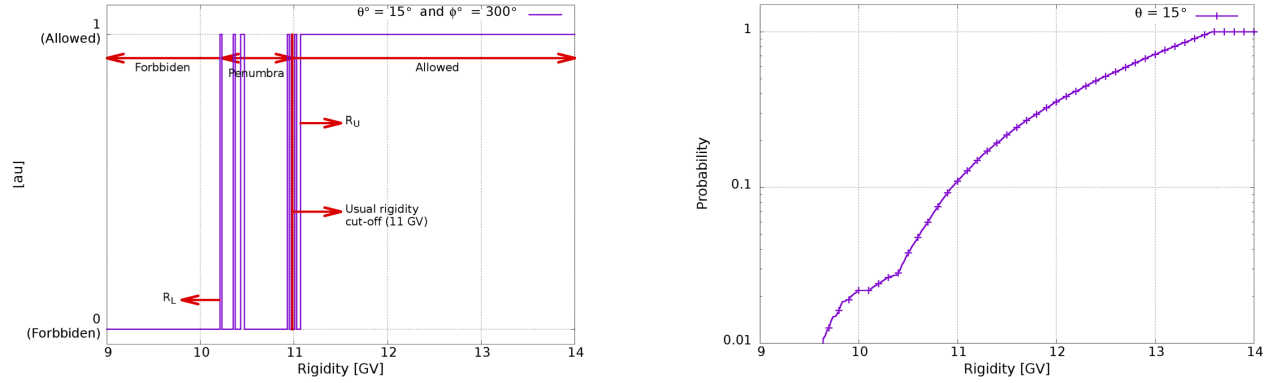


Figura 2: Estas gráficas ilustran la región de penumbra y para el arribo de primarios sobre Bucaramanga bajo ángulos cenitales 15° y azimutales 300° el 13 mayo 2005. La imagen de la izquierda muestra el esquema tradicional, mientras que en la de la derecha representa el cálculo mediante nuestro esquema. Note que aún para aquellas “zonas prohibidas” para energías en el intervalo 10,2GeV - 11,2GeV, existirán trayectorias que contribuyen al flujo de partículas en un determinado punto de observación.

En la figura 2 se comparan la forma tradicional con los resultados de la implementación de nuestro algoritmo.

Pero, mas aún, podemos extender nuestra definición (3) para los casos de variaciones del campo geomagnético que modulen la rigidez de corte,

$$R_C(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, \theta, P(R_m(\theta))) \rightarrow R_C(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, \theta, t, P(R_m(\theta), t)), \quad (6)$$

donde ahora, equivalentemente, $P(R_m(\theta), t)$ representa la función de distribución acumulativa calculada para cada instante de tiempo de la forma

$$P(R_m(\theta)) = \sum_{R_m=R_{Lmin}}^{R_m=R_{Umax}} \wp(R_m(\theta), t). \quad (7)$$

En la próxima sección mostraremos los efectos de estas nuevas definiciones en la corrección del flujo de rayos cósmicos y sus consecuencias en las cascadas de secundarios que arriban a la superficie terrestre.

3.4. Condiciones seculares: primarios y secundarios corregidos

A partir de las definiciones de rigidez de corte que presentamos en la sección anterior, podemos calcular tres tipos de flujo de primarios, $\Phi_{(i)}$, calculados a 112km de altura:

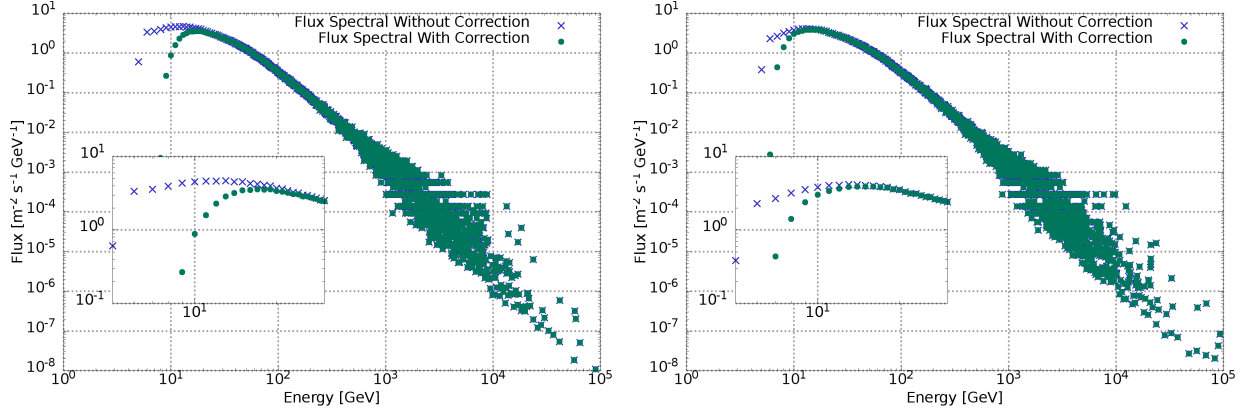


Figura 3: Flujo de primarios a 112Km s.n.m con las correcciones estándares ($\Phi_{(0)}$ denotado con cruces azules) y con nuestro método propuesto para condiciones seculares ($\Phi_{(1)}$, cuadrados verdes). La gráfica izquierda Bucaramanga y la derecha San Carlos de Bariloche. Son evidentes las diferencias para los rayos cósmicos de baja energía

- $\Phi_{(0)}$ con $R_{C(0)}$, para la definición usual de rigidez de corte (2).
- $\Phi_{(1)}$ con $R_{C(1)}$, para rigidez de corte en condiciones seculares, para escalas tiempo mayores a un año y descritas por la ecuación (4).
- $\Phi_{(2)}$ con $R_{C(2)}$, para la ecuación (6), que describe las modulaciones del flujo de partículas debidas variaciones del campo geomagnético.

En los tres casos definimos p_{\min} como la mínima cantidad de movimiento permitida para rigidez de corte determinada, i.e.

$$p_{\min} = \frac{Ze}{c} R_{C(i)}, \text{ con } i = 0, 1, 2. \quad (8)$$

En las figuras 3 graficamos los flujos $\Phi_{(0)}$ usando la definición de rigidez de corte tradicional y $\Phi_{(1)}$ cuando incorporamos nuestro esquema de probabilidades acumulativas. Para los dos casos sólo se muestran aquellos flujos que generan secundarios al nivel del suelo. Son claros que en ambas posiciones geográficas se aprecian cambios en los flujos de primarios para los rangos de bajas energías ~ 15 GeV.

Evidentemente, los flujos de primarios, $\Phi_{(i)}$ generan cascadas de secundarios, $\Xi_{(i)}$, las cuales arriban a la superficie terrestre. Estas cascadas corregidas se desarrollaron con CORSIKA y su espectro/composición al llegar a Bucaramanga y San Carlos de Bariloche se encuentra graficado en la figura 3.

En esta figura, es interesante destacar el pico que presenta la distribución de neutrones

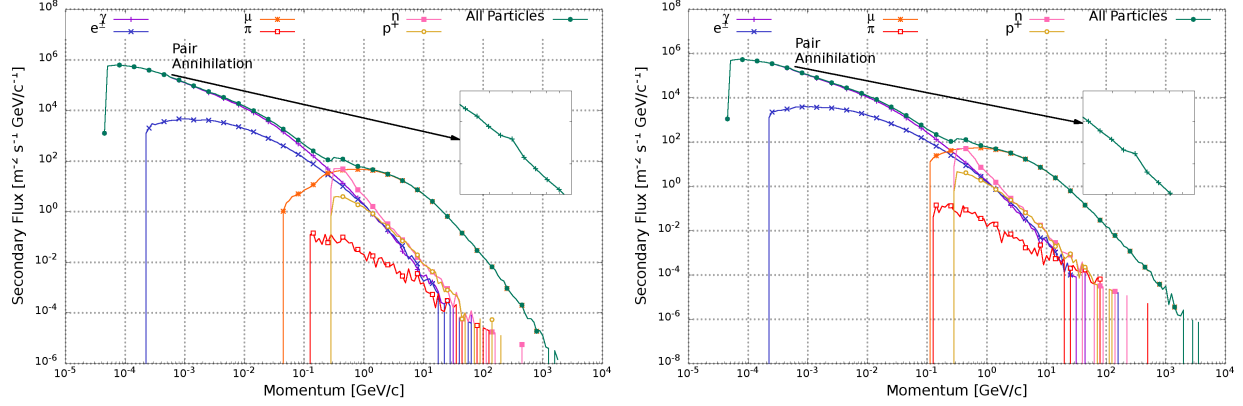


Figura 4: Los espectros de secundarios, $\Xi_{(1)}$, esperados en los detectores de Bucaramanga (a la izquierda) y San Carlos de Bariloche (imagen derecha) a nivel del detector. Se ilustran fotones (púrpura), electrones y positrones (azul), muones (naranja), piones (rojo), neutrones (rosado), protones (oro), total espectro de secundarias (verde). Se resalta en una ampliación un pequeño pico, para $E = 511\text{KeV}$, que corresponde a la aniquilación de pares e^\pm .

y protones en ambos sitios y, así como también la presencia de las “jorobas de muones”¹⁰ para ambas posiciones geográficas. Igualmente aparece un pequeño pico, para $E = 511\text{KeV}$, que se ilustra en una ampliación y que corresponde a la aniquilación de pares e^\pm .

Definimos entonces la *diferencia porcentual de flujo de secundarios*, $\Delta\Xi_{i-j}$, para comprender mejor las correcciones geomagnéticas que hemos incorporados:

$$\text{Diferencia}_{\%} \equiv \Delta\Xi_{i-j} = 100 \left(\frac{\Xi_{(i)} - \Xi_{(j)}}{\Xi_{(i)}} \right) \%, \quad (9)$$

donde i y j son los índices correspondientes a las distintas correcciones que discutimos al inicio de esta sección.

En las figuras 5 se muestran esas diferencias porcentuales en los flujos para Bucaramanga y San Carlos de Bariloche. Para ambos puntos geográficos es notable la presencia de una mayor influencia de la corrección, $\Delta\Xi_{0-1}$, alrededor de los $\sim 500\text{MeV/c}$, la cual es mas marcada para Bucaramanga ($\approx 25\%$) que para Bariloche ($\approx 14\%$). Para energías menores es clara la mayor relevancia de las correcciones en Bucaramanga mientras que, para energías superiores a $\sim 10\text{ GeV}$, en ambos casos, las correcciones no revisten importancia.

Cuando se explora con mayor detenimiento la composición de estas diferencias a bajas energías, encontramos que está n dominadas por neutrones y representan una disminución del orden del 35% [3]. Estos resultados concuerdan con los registros de la red monitores de

¹⁰Así se conoce en el *argot* de la comunidad el rango de energía en el cual el flujo de muones es casi constante y que se utiliza para calibrar los detectores Cherenkov de agua [33, 34].

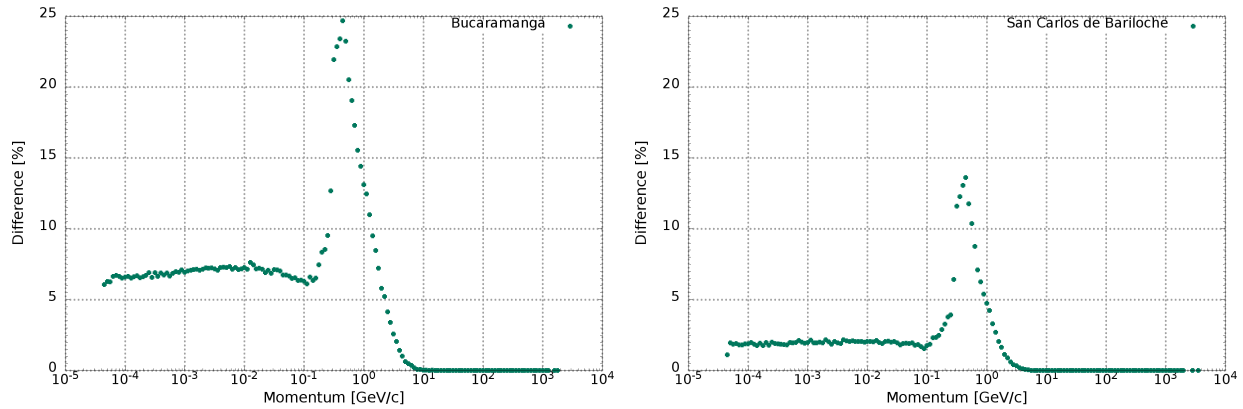


Figura 5: Diferencia porcentual de flujo de secundarios, $\Delta\Xi_{0-1}$, en condiciones seculares para Bucaramanga (izquierda) y San Carlos de Bariloche (derecha). Son evidentes las diferencias entre 100 MeV/c y 3 GeV, con un pico muy marcado alrededor de ~ 500 MeV/c, siendo mas importantes para Bucaramanga que para San Carlos de Bariloche.

neutrones¹¹ utilizados para auscultar el clima espacial.

3.5. Correcciones para condiciones dinámicas

Completa esta sección con la descripción de la especial capacidad que tiene nuestra herramienta de simular distribuciones de secundarios modulados por fenómenos solares transitorios. Es indispensable señalar, que estamos considerando la modulación del fondo de rayos cósmicos galácticos por efecto de la variabilidad solar y no la contribución del viento solar. Una muestra de esa posibilidad se concreta en el estudio de la función diferencia porcentual de flujo $\Delta\Xi_{1-2}$ para varios componentes durante la tormenta geomagnética del 13 al 17, de mayo de 2005. Las variaciones del campo geomagnético en esta tormenta fueron muy significativas y recibieron especial atención por parte de la comunidad de clima espacial (ver por ejemplo [35] para una descripción detallada).

En la figura 6 se ilustran tres diferencias porcentuales de flujo: la total $\Delta\Xi_{1-2}$ (verde), la muonica $\Delta\Xi_{1-2}^\mu$ (anaranjado) y la de neutrones $\Delta\Xi_{1-2}^n$ (rosado). En todos los casos, nuestros datos simulados se comparan (línea gris) con los registros tomados de la red mundial de monitores de neutrones disponibles en <http://www.nmdb.eu>. Seleccionamos dos monitores de neutrones con rigideces de corte similares a nuestros puntos de evaluación. Para Bucaramanga utilizamos los datos del *Israel Cosmic Ray and Space Weather Center & Emilio Segre Cosmic Ray Observatory* en el Monte Hermon con $R_{C(0)} = 10,75$ y para San Carlos de Bariloche los tomamos de Monitor de Neutrones de la UNAM en ciudad de México, $R_{C(0)} = 8,28$ GV.

¹¹<http://www.nmdb.eu/>

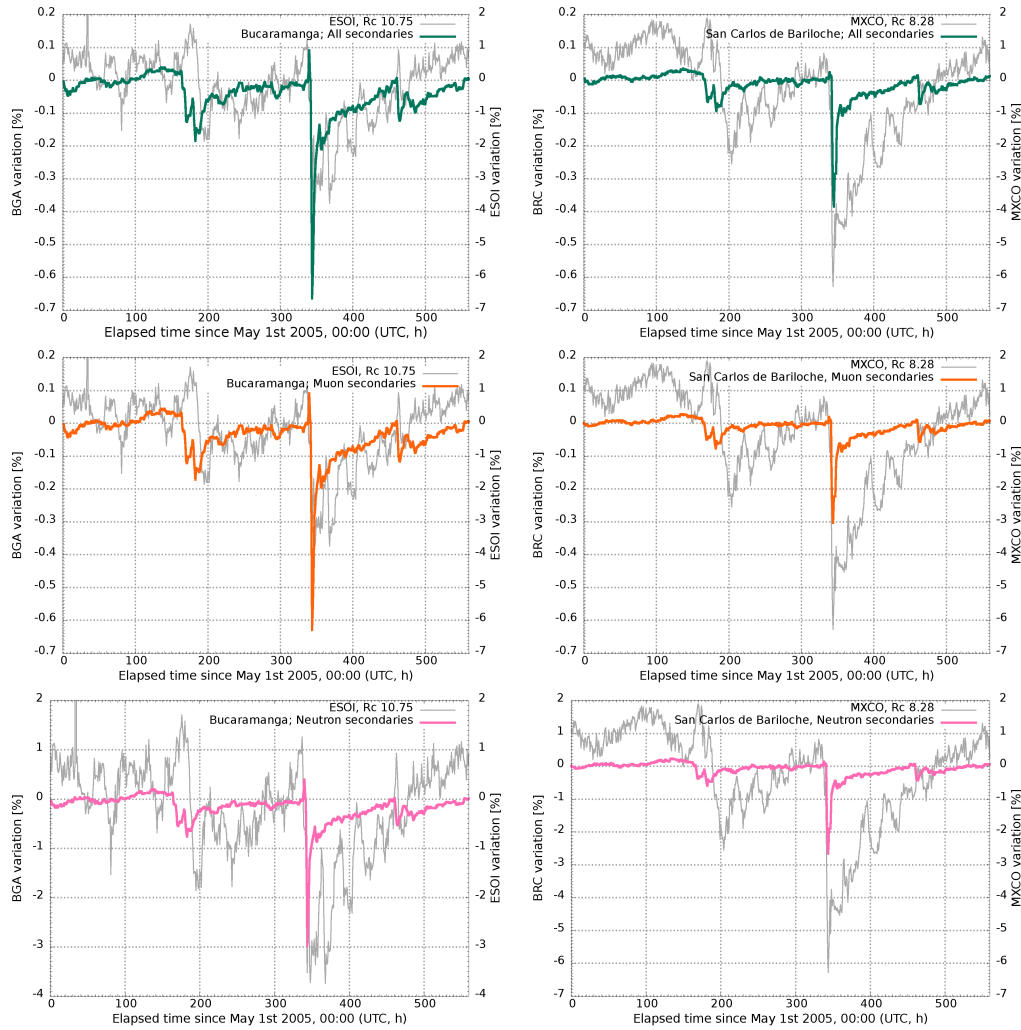


Figura 6: Simulación de la Evolución temporal de la variación porcentual de flujo de secundarios, $\Delta\Xi_{1-2}$ en Bucaramanga (columna izquierda) y San Carlos de Bariloche (columna derecha), durante tormenta geomagnética de mayo del 2005. Los trazos verdes corresponden a las diferencias porcentuales totales $\Delta\Xi_{1-2}$, los anaranjados a la muonica $\Delta\Xi_{1-2}^{\mu}$ y los rosados a la de neutrones $\Delta\Xi_{1-2}^n$. Todos estos trazos se comparan con los mediciones de monitores de neutrones (líneas grises) con equivalentes rigideces de corte. Note la diferencia de escala en el eje y de cada una de las figuras.

Es evidente que, además de la coincidencia temporal de las variaciones de flujo, la diferencia es mas significativa en Bucaramanga que en Bariloche y, como era de esperarse, el flujo de neutrones a nivel del suelo es la componente que mas se ve afectada por las variaciones del campo geomagnético[36].

4. Impacto y trascendencia

En este trabajo hemos presentado un esquema de cálculo para estimar el flujo de partículas en cualquier punto de la superficie terrestre. Este esquema considera las correcciones geomagnéticas tanto para condiciones seculares (para escalas de tiempo del orden de años) como dinámicas (fenómenos transitorios que ocurren horas). Consideramos que, nuestro método representa una mejora sustancial respecto a los anteriores esquemas, los cuales pueden ser considerados como una primera aproximación cuando se requiera determinar un flujo de secundarios realista contabilizando los efectos del campo geomagnético.

Esta capacidad diferenciadora de calcular con elevada precisión el flujo de partículas de baja energía y aplicarla a proyectos en varias áreas, nos ha consolidado como una referencia obligada en Astropartículas en Colombia. Nuestro equipo participa en dos colaboraciones internacionales y desarrolla aplicaciones de las técnicas de Astropartículas en proyectos de Física Médica, Geofísica y diseño de detectores.

A continuación describiremos algunos de los impactos y las nuevas líneas de investigación que el presente trabajo ha impulsado (varias de las cuales se encuentran descritas en [37, 38] y las referencias allí citadas).

Uno de los legados mas significativos de este proyecto es la formación de una generación de Físicos con dominio de técnicas de simulación e instrumentación en Astropartículas. La formación de personal sobre la cual se ha construido esta línea de investigación dentro del Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación –ruta que acompañado a la formación de Mauricio desde el pregrado al Doctorado– ha sido muy fructífera y la podemos resumir en:

- 11 tesis de pregrado (ocho en Física [2, 24, 39, 40, 41, 42, 43, 44] y tres en Ingeniería Electrónica [45, 46, 47]);
- seis tesis de Maestría (cuatro en Física [3, 25, 48, 49] y dos en Geofísica [50, 51].

A lo largo de estos años, muchos de estos trabajos han sido reseñados en publicaciones científicas [1, 23, 37, 38, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65]

Tal y como hemos mencionado, la utilización temprana de los resultados del presente trabajo ha abierto nuevas líneas de investigación que se listan a continuación:

- La salud ocupacional de tripulaciones la hemos iniciado a considerar con la realización de una tesis de pregrado en Física laureada [40] y dos publicaciones [53, 61]. Las rutas

de aeronavegación cruzan regiones con diferentes rigideces magnéticas. Por lo tanto, un esquema de cálculo como el que presentamos aquí es indispensable, cuando queremos evaluar el flujo de partículas que impactan las aeronaves y las dosis de radiación absorbidas por los tejidos de sus tripulaciones. La mayor parte de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes surge de nuestra experiencia en rangos de energía de cientos de megaelectrón voltios ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$). Sin embargo, las radiaciones de origen extraterrestre tienen mucha mayor energía (típicamente $\approx 10^8 - 10^{12} \text{ eV}$), y no es claro que las metodologías y parámetros desarrollados para bajas energías sean válidos para estos nuevos escenarios (para detalles de la discusión sobre la validez de los estándares y metodologías de daño en tejidos biológicos por radiación cósmica puede consultarse [66, 67] y las referencias allí citadas).

- El modelado de detectores de partículas ha sido mas trabajado y lo hemos abordado a partir de dos tesis de pregrado en Física, una de ellas laureada [24, 42] y dos tesis de maestría [3, 25]. Para calibrar los detectores de la colaboración LAGO es vital estimar el flujo de sus distintas instalaciones ubicadas a variadas alturas y en regiones con diferentes rigideces. Adicionalmente, cada vez más, esta colaboración centra su estudio en fenómenos relacionados con el clima espacial a partir de primarios de baja energía donde las correcciones son mas necesarias.
- Finalmente la aplicación a muografía de volcanes se ha concretado en una tesis de pregrado en Física laureada [44] y un artículo que está en revisión [62]. La muografía de volcanes por transmisión se basa –al igual que las imágenes de Rayos X– en generar imágenes a partir de los muones atmosféricos producidos en las cascadas de rayos cósmicos. Estos muones atraviesan las estructuras geológicas y algunos son absorbidos por la roca. Se puede establecer una asociación entre la distribución de densidades del material y el número de muones absorbidos (ver [68] y las referencias allí citadas) en su paso a través de la estructura. Nuestro grupo ha incursionado en este campo y hemos utilizado el presente trabajo para estimar con elevada precisión el flujo que impacta la estructura geológica.

Referencias

- [1] H. Asorey, L. A. Núñez, y M. Suárez-Durán. Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain. *Space Weather*, 16(5):461–475, 2018.
- [2] M Suárez-Durán. Instalación de un detector cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [3] M. Suárez-Durán. Modulación de rayos cósmicos a nivel del suelo por cambios en el campo geomagnético, para la colaboración LAGO. Tesis maestría en física, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [4] P.K.F. Grieder. *Cosmic rays at Earth*, volume 1. Elsevier B.V., 2001.
- [5] B Wiebel-Sooth, y PL Biermann. Cosmic rays. VII. Individual element spectra: prediction and data. *Astronomy and Astrophysics*, 330:389–398, 1998.
- [6] H. Asorey. Measurement of Low Energy Cosmic Radiation with the Water Cherenkov Detector Array of the Pierre Auger Observatory. In *Proceedings of the 32th International Cosmic Ray Conference ICRC 2011*, volume 11, pages 462–465, Beijing, China, 2011. Chinese Academy of Sciences.
- [7] S. Dasso, y H. Asorey. The scaler mode in the Pierre Auger Observatory to study heliospheric modulation of cosmic rays. *Advances in Space Research*, 49(11):1563–1569, June 2012.
- [8] Carolus J. Schrijver, and George L. Siscoe, Editores. *Helipysics: Evolving Solar Activity and the Climates of Space and Earth*. Cambridge University Press, New York, USA, 1 edition, 2010.
- [9] K. Herbst, A. Kopp, B. Heber, F. Steinhilber, H. Fichtner, K. Scherer, y D. Matthiä. On the importance of the local interstellar spectrum for the solar modulation parameter. *Journal of Geophysical Research*, 115:1–9, July 2010.
- [10] S. E. Forbush. World-Wide Cosmic-Ray Variations, 1937-1952. *Journal of Geophysical Research*, 59(4):525–542, 1954.
- [11] P. Meyer, y J. Simpson. Changes in the Low-Energy Particle Cutoff and Primary Spectrum of Cosmic Radiation. *Physical Review*, 99(5):1517–1523, September 1955.
- [12] JA Simpson. A brief history of recurrent solar modulation of the galactic cosmic rays (1937-1990). *Space science reviews*, 83(1-2):169–176, 1998.

- [13] J.L. Burch, R.B. Torbert, T.D. Phan, L.J. Chen, T.E. Moore, R.E. Ergun, J.P. Eastwood, D.J. Gershman, P.A. Cassak, M.R. Argall, S. Wang, M. Hesse, C. J. Pollock, B. L. Giles, R. Nakamura, B. H. Mauk, S. A. Fuselier, C. T. Russell, R. J. Strangeway, J. F. Drake, M. A. Shay, Yu. V. Khotyaintsev, P. A. Lindqvist, G. Marklund, F. D. Wilder, D. T. Young, K. Torkar, J. Goldstein, J. C. Dorelli, L. A. Avano, M. Oka, D. N. Baker, A. N. Jaynes, K. A. Goodrich, I. J. Cohen, D. L. Turner, J. F. Fennell, J. Blake, J. B. and Clemmons, M. Goldman, D. Newman, S. M. Petrinen, K. J. Trattner, B. Lavraud, P. H. Reiff, W. Baumjohann, W. Magnes, M. Steller, W. Lewis, Y. Saito, V. Coffey, y M. Chandler. Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space. *Science*, page aaf2939, 2016.
- [14] G. Schubert. *Treatise on Geophysics*. Elsevier, April 2015.
- [15] W. Lowrie. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, September 2007.
- [16] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barend, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytrcek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebvre, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatsu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, y D. Zschesche. Geant4: a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3):250–303, 2003.
- [17] C. C. Finlay, S. Maus, C. D. Beggan, T. N. Bondar, A. Chambodut, T. A. Chernova, A. Chulliat, V. P. Golovkov, B. Hamilton, M. Hamoudi, R. Holme, G. Hulot, W. Kuang, B. Langlais, V. Lesur, F. J. Lowes, H. Lüher, S. MacMillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle, I. Michaelis, N. Olsen, J. Rauberg, M. Rother, T. J. Sabaka,

- A. Tangborn, L. Töffner-Clausen, E. Thébault, A. W. P. Thomson, I. Wardinski, Z. Wei, y T. I. Zvereva. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183:1216–1230, December 2010.
- [18] N. A. Tsyganenko. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1. mathematical structure. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A8):SMP 12–1–SMP 12–15, 2002.
- [19] L. Desorgher. MAGNETOSCOSMICS, Geant4 application for simulating the propagation of cosmic rays through the Earth magnetosphere. Technical report, Physikalisches Institut, University of Bern, Bern, Germany, 2003.
- [20] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, y T. Thouw. Corsika : A monte carlo code to simulate extensive air showers. Technical Report FZKA 6019, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998.
- [21] L. Otiniano, F. Quispe, J. Truyenque, S. Vargas, y la Colaboración LAGO. Development of a high altitude LAGO site in Perú. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 688, 2015.
- [22] S. Vargas, C. Mantilla, O. Martínez, N. Vázquez, D. Cazar-Ramírez, y la Colaboración LAGO. Lago ecuador, implementing a set of wcd detectors for space weather research: first results and further developments. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 135, 2015.
- [23] R. Calderón-Ardila, H. Asorey, L. A. Núñez, y la Colaboración LAGO. Geant4 based simulation of the water cherenkov detectors of the LAGO project. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, pages 424–426, 2015.
- [24] A. Jaimes-Motta. Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga(956 m s.n.m). Tesis de pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [25] A. Vásquez-Ramírez. Estimación de la respuesta generada por el detector MuTe al paso de partículas cargadas. Tesis de maestría en física, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [26] M. Rodríguez-Pascual, R. Mayo-García, y I. M. Llorente. Montera: a framework for efficient execution of Monte Carlo codes on grid infrastructures. *Computing and Informatics*, 32(1):113–144, 2013.
- [27] A.J. Rubio-Montero, E. Huedo, F. Castejón, y R. Mayo-García. Gwpilot: Enabling multi-level scheduling in distributed infrastructures with gridway and pilot jobs. *Future Generation Computer Systems*, 45:25–52, 2015.

- [28] A.J. Rubio-Montero, E. Huedo, y R. Mayo-García. User-guided provisioning in federated clouds for distributed calculations. In *International Workshop on Adaptive Resource Management and Scheduling for Cloud Computing*, pages 60–77. Springer, 2015.
- [29] M. A. Shea, D. F. Smart, y K. G. McCracken. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 70(17):4117–4130, 1965.
- [30] H. Carmichael, M. A. Shea, D. F. Smart, y John R. McCall. Iv. geographically smoothed geomagnetic cutoffs. *Canadian Journal of Physics*, 47(19):2067–2072, 1969.
- [31] D. F. Smart, y M. A. Shea. Fifty years of progress in geomagnetic cutoff rigidity determinations. *Advances in Space Research*, 44(10):1107–1123, 2009.
- [32] D. J. Cooke, J. E. Humble, M. A. Shea, D. F. Smart, N. Lund, I. L. Rasmussen, B. Byrnes, P. Goret, y N. Petrou. On cosmic-ray cut-off terminology. *Il Nuovo Cimento C*, 14(3):213–234, 1991.
- [33] A. Etchegoyen, P. Bauleo, X. Bertou, C.B. Bonifazi, A. Filevich, M.C. Medina, D.G. Melo, A.C. Rovero, A.D. Supanitsky, y A. Tamashiro. Muon-track studies in a water cherenkov detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 545(3):602 – 612, 2005.
- [34] La Colaboración LAGO [H. Asorey]. The LAGO Solar Project. In *Proceedings of the 33th International Cosmic Ray Conference ICRC 2013*, Río de Janeiro, Brazil, 2013.
- [35] B. J. Adekoya, V. U. Chukwuma, N. O. Bakare, y T. W. David. On the effects of geomagnetic storms and pre storm phenomena on low and middle latitude ionospheric F2. *Astrophysics and Space Science*, 340(2):217–235, aug 2012.
- [36] A. Belov, L. Baisultanova, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, V. Yanke, V. Pchelkin, C. Plainaki, y G. Mariatos. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9):1–9, sep 2005.
- [37] H. Asorey and L. A. Núñez. Astroparticle physics at the eastern Colombia region. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1693, page 060008. AIP Publishing, 2015.
- [38] H. Asorey, R. Calderón-Ardila, C. R. Carvajal-Bohorquez, S. Hernández-Barajas, L. Martínez-Ramírez, A. Jaimes-Motta, F. León-Carreño, J. Peña-Rodríguez, J. Pisco-Guavabe, J.D. Sanabria-Gómez, M. Suárez-Durán, A. Vásquez-Ramírez, K. Forero-Gutiérrez, J. Salamanca-Coy, L. A. Núñez, y D. Sierra-Porta. Astroparticle projects

- at the eastern Colombia region: facilities and instrumentation. *Scientia et technica*, 23(3):391–396, 2018.
- [39] C. Sarmiento-Cano. Identificación de destellos gamma en los repositorios de datos de la colaboración LAGO. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2012.
- [40] S. Pinilla Velandia. Alertas de meteorología espacial para la navegación aérea. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [41] A. Estupiñan López. Método de *Thinining & Dethining* para lluvias de primarios con alta energía. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [42] Calderón-Ardila. Simulación de los detectores Cherenkov en agua de la colaboración LAGO. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [43] A. Nuñez-Castiñeyra. Sensibilidad del proyecto LAGO a señales gamma proveniente del centro de la galaxia. Tesis pregrado, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de lo Andes, Venezuela, May 2015.
- [44] M.L. Valencia-Otero. Estudio de las componentes de secundarios en cascadas originadas por rayos cósmicos para aplicaciones sobre estructuras geológicas. Tesis pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2017.
- [45] S. León-Carreño, F. y Hernández-Barajas. Calibración del hardware del detector cherenkov de agua chitaga en el arreglo guane para estudios de clima espacial. Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [46] J. Forero-Gutiérrez, K. y Salamanca-Coy. Diseño e implementación de la electrónica de discriminación y registro para un Telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos. Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [47] J. Sánchez-Villafrades. Diseño e implementación de un sistema de caracterización de los sipms del telescopio de muones mute. Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [48] C. Sarmiento-Cano. Búsqueda de fuentes de astropartículas en los datos de la colaboración LAGO. Tesis maestría en Física, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2015.

- [49] Y. Pérez. Aplicaciones en meteorología espacial de los datos del proyecto LAGO. Tesis maestría en física, Centro de Física Fundamental, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela, Mérida, Venezuela, Mayo 2015.
- [50] M.A. Vesga-Ramírez. Inversión geofísica a partir de datos de muongrafía volcánica para proyecto mute. Tesis maestría en geofísica, Escuela de Física Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [51] R. Calderón Ardila. Estudio de centelladores plásticos en el proyecto mute para muongrafía de volcanes. Tesis de maestría en física, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [52] H. Asorey, A. Balaguera-Rojas, L. A. Núñez, J. D. Sanabria-Gómez, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, M. Valencia-Otero, y A. Vesga-Ramírez. Astroparticle Techniques: Colombia Active Volcano Candidates for Muon Telescope Observation Sites. In *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, volume 49 of *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, pages 54–54, July 2017.
- [53] S. Pinilla, H. Asorey, y L.A. Núñez. Cosmic rays induced background radiation on board of commercial flights. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267-269:418–420, 2015.
- [54] A. Estupiñan, H. Asorey, y L. A. Núñez. Implementing the de-thinning method for high energy cosmic rays extensive air shower simulations. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267-269:421–423, 2015.
- [55] H. Asorey, D. Cazar-Ramírez, R. Mayo-García, L.A. Núñez, M. Rodríguez-Pascual, L.A. Torres-Niño, y la Colaboración LAGO. Data accessibility, reproducibility and trustworthiness with LAGO data repository. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 672, 2015.
- [56] H. Asorey, S. Dasso, L.A. Núñez, Y. Pérez, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, y la Colaboración LAGO. The LAGO space weather program: Directional geomagnetic effects, background fluence calculations and multi-spectral data analysis. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 142, 2015.
- [57] H. Asorey, P. Miranda, A. Núñez-Castiñeyra, L.A. Núñez, J. Salinas, C. Sarmiento-Cano, R. Ticona, A. Velarde, y la Colaboración LAGO. Analysis of background cosmic ray rate in the 2010-2012 period from the LAGO detectors at chacaltaya. In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 414, 2015.
- [58] H. Asorey, A. Núñez-Castiñeyra, L.A. Núñez, J. Peña-Rodríguez, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, y la Colaboración LAGO. The guane array of the LAGO project.

- In *The 34th International Cosmic Ray Conference*, volume PoS(ICRC2015), page 679, 2015.
- [59] M. Rodríguez-Pascual, G. LaRocca, C. Kanellopoulo, C. Carrubba, G. Inserra, R. Ricci, H. Asorey, A.J. Rubio-Montero, E. Núñez-González, L.A. Núñez, O. Prnjat, R. Barbera, y R. Mayo-García. A resilient methodology for accessing and exploiting data and scientific codes on distributed environments. In *Computational Science and Engineering (CSE), 2015 IEEE 18th International Conference on*, pages 319–323. IEEE, 2015.
- [60] H. Asorey, L.A. Núñez, M. Suárez-Durán, L.A. Torres-Niño, M. Rodríguez-Pascual, A.J. Rubio-Montero, y R. Mayo-García. The latin american giant observatory: a successful collaboration in latin america based on cosmic rays and computer science domains. In *Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2016 16th IEEE/ACM International Symposium on*, pages 707–711. IEEE, 2016.
- [61] H. Asorey, L.A. Núñez, C.Y. Pérez-Arias, S. Pinilla, F. Quiñonez, y M. Suárez-Durán. Astroparticle techniques: Simulating cosmic rays induced background radiation on aircrafts. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 49:57, 2017.
- [62] H. Asorey, L. A. Núñez, J. D. Sanabria-Gómez, C. Sarmiento-Cano, D. Sierra-Porta, M. Suárez-Durán, M. Valencia-Otero, y A. Vesga-Ramírez. Muon Tomography sites for Colombia volcanoes. *ArXiv e-prints*, May 2017.
- [63] H. Asorey, R. Calderón-Ardila, K. Forero-Gutiérrez, L.A. Núñez, J. Peña-Rodríguez, J. Salamanca-Coy, D. Sanabria-Gómez, J. Sánchez-Villafrades, y D. Sierra-Porta. minimute: A muon telescope prototype for studying volcanic structures with cosmic ray flux. *Scientia et technica*, 23(3):386–390, 2018.
- [64] H. Asorey, S. Hernández-Baraja, F. León-Carreño, L. A. Núñez, J. Peña-Rodríguez, J. Pisco-Guabave, D. Sierra-Porta, y M. Suárez-Durán. Hardware-level calibration of the chitaga water cherenkov detector in the guane array for space weather study. *Scientia et technica*, 23(4):563, December 2018.
- [65] H Asorey, L.A. Núñez, y C Sarmiento-Cano. Exposición temprana de nativos digitales en ambientes, metodologías y técnicas de investigación en la universidad. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2018.
- [66] M. Maalouf, M. Durante, y N. Foray. Biological effects of space radiation on human cells: history, advances and outcomes. *Journal of radiation research*, 52(2):126–146, 2011.
- [67] M Durante. New challenges in high-energy particle radiobiology. *The British journal of radiology*, 87(1035):20130626, 2014.

- [68] R. Kaiser. Muography: overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2137):20180049, January 2019.