

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Simulation of Extensive Air Showers in the Presence
of Variation in Geoelectric and Geomagnetic Fields**

Diego Alberto Coloma Borja

Física

Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del título de

Físico

Quito, 20 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN

DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Simulation of Extensive Air Showers in the Presence of
Variation in Geoelectric and Geomagnetic Fields**

Diego Alberto Coloma Borja

Nombre del profesor, Título académico:

Edgar Carrera, Ph. D.

Quito, 20 de diciembre de 2020

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Diego Alberto Coloma Borja
Código:	00139865
Cédula de Identidad:	0922789151
Lugar y fecha:	Quito, 18 de diciembre de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

Dedicado a mis abuelos, Ernesto Borja y Olga Ibarra, que me miran desde sus retratos en la sala

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia que ha sufrido terribles dolores de cabeza para ayudarme en todo lo que han podido; a mis amigos, que siempre me han ayudado a reconstruirme cuando yo mismo me he auto-destruido; a la Universidad San Francisco de Quito, por darme un espacio donde crecer y descubrirme durante los últimos años; y a los profesores de la carrera de física, especialmente a Edgar Carrera por su mentoría y por empujarme siempre a realizar trabajos más complicados de los que jamás hubiera creído completar. Gracias a eso, tenemos el siguiente proyecto.

Resumen

En este trabajo se pretendió, según modelos establecidos, estudiar los posibles efectos que los cambios en los campos geoelectricos y geomagnéticos (relacionados a la presencia de actividad sísmica en una región) ejercen sobre la detección de partículas secundarias de cascadas aéreas externas iniciadas por rayos cósmicos primarios en la atmósfera terrestre. Para esto, se realizaron simulaciones de fluencia de secundarios utilizando el código CORSIKA en el contexto de la colaboración LAGO para detección de partículas y su análisis. Para realizar las simulaciones, se tomó en cuenta el nivel del suelo como la posición en la que se podría ubicar un detector de agua Cherenkov en la Universidad San Francisco de Quito (2200 m.s.n.m) como sitio de LAGO. Además, la variación de los parámetros de los campos se basa en estudios relevantes sobre actividad sísmica. Los resultados muestran que existe una variación en la entrada de partículas, que sería posible detectar usando los instrumentos apropiados .

Palabras clave: Cascadas Aéreas Externas, LAGO, Simulaciones, Rayos Cósmicos, Detección de rayos de Partículas Secundarias, Actividad Sísmica, Campo Geo-eléctrico, Campo Geo-Magnético

Abstract

In this project, based on relevant models, the aim was to study the possible effects that changes in geomagnetic and geoelectric fields (related to seismic activity in a given region on the detection) have on secondary particles from Extensive Air Showers (EAS) initiated by cosmic rays incident on the Earth's atmosphere. For this purpose, Flux of secondary particle simulations were performed using the CORSIKA code in the context of the LAGO collaboration for particle detection and analysis. To create the simulations, the ground level was taken to be located on the position where a Water Cherenkov detector could be placed at Universidad San Francisco de Quito (m.a.s.l.) as a LAGO site. Additionally, the variation in field parameters was based on relevant studies on seismic activity. The results show that there exists a change in particle entry, which could be detected given appropriate instruments.

Keywords: Extensive Air Showers, LAGO, Simulations, Cosmic Rays, Secondary Particle Rays Detection, Seismic Activity, Geoelectric Field, Geomagnetic field.

Índice general

Índice de cuadros	10
Índice de figuras	11
1. Introducción	13
1.1. Rayos Cósmicos y Cascadas Aéreas Extensas (CAE)	13
1.2. Actividad Sísmica y su efecto en los Campos Geoeléctricos y Geomagnéticos . . .	15
2. El Observatorio Latinoamericano Gigante	17
2.1. Colaboración LAGO	17
2.2. Detectores LAGO	18
2.3. Simulaciones de Fluencia	19
3. Simulaciones en CORSIKA	21
3.1. Cascadas iniciadas por un único protón	22
3.2. Simulación de Una Hora de Fluencia	25
4. Conclusiones	30
Bibliografía	32
Bibliografía	33
A. Tabla de Ubicaciones de LAGO	37

Índice de cuadros

3.1. Número de partículas a nivel del detector clasificadas por tipo en las distintas condiciones de cambio de campos geoelectricos y geomagnéticos consideradas para una cascada iniciada por un protón de $10^4 GeV$	23
3.2. Número de partículas a nivel del detector clasificadas por tipo en las distintas condiciones de cambio de campos geoelectricos y geomagnéticos considerada por de una hora de fluencia de entrada de primarios	27
A.1. Tabla de Ubicaciones de LAGO, con parámetros de la ubicacion. [1]	37

Índice de figuras

1.1. Esquema de desarrollo de una cascada producida por la entrada de un protón como primario. Se exagera la separación de los distintos componentes de la cascada por efecto de ilustración. Se añaden los neutrinos producidos en las interacciones por completitud [2]	14
2.1. Mapa de sitios de LAGO en el continente, y rigidez de corte para cada uno de los sitios. Figura creada a partir del código en [1]. Detalle de las ubicaciones en el apéndice A.	17
2.2. WCD instalado en Riobamba, Ecuador (2784 m.s.n.m.). Se muestra el tanque además de el tubo foto-multiplicador y su soporte	19
3.1. Distribución en el suelo a nivel del detector (2200 m.s.n.m.) de partículas secundarias resultado de la simulación de una cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV. (a) Condiciones Regulares ($E_x = 0$, $E_z = 0$, $B_x = 11,05\mu T$, $B_z = 4,135\mu T$) (b) Cambio en campo Magnético vertical indicado por $B_z - 0,25\mu T$. (c) Cambio en campo eléctrico vertical indicado por $E_z - 10V/cm$. Notamos ciertas diferencias en la forma de las distribuciones en la presencia de estos cambios.	22
3.2. Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m.) con respecto a la distancia absoluta a la posición del detector (0,0) de los diferentes tipos de partículas de la componente electromagnética de la cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV. Condiciones normales (azul), Cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa similitudes en la forma de las distribuciones, notando que aumenta la entrada de partículas para los cambios en campos geoelectrónicos y geomagnéticos. Con particular diferencia en la distribución con cambio en campo eléctrico.	24
3.3. Distribución en el suelo a nivel del detector (2200 m.s.n.m) de partículas secundarias resultado de la simulación realizada para una hora de fluencia de partículas primarias. (a) Condiciones Regulares ($E_x = 0$, $E_z = 0$, $B_x = 11,031\mu T$, $B_z = 4,081\mu T$). (b) Cambio en campo Magnético vertical $B_z - 0,25\mu T$. (c) Cambio en campo eléctrico vertical $E_z - 10V/cm$. Es posible notar ciertas diferencias en las formas de la distribuciones entre los tres casos.	26
3.4. Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m.) con respecto a la distancia absoluta a la posición del detector (0,0) de los diferentes tipos de partículas secundarias de las componentes electromagnética y muónica simuladas para una hora de fluencia. Condiciones normales (azul), cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa similitudes en la forma de las distribuciones, no se observa un cambio claro entre las formas de la distribución. Si este existe, es muy pequeño en proporción con la distribución completa.	28

- 3.5. Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m) y en la vecindad del detector que se encontraría en la posición (0,0). Considerando las diferentes partículas parte de la comorte electromagnética y muónica simuladas para una hora de fluencia de primarios de diferente tipo. Donde tenemos: Condiciones normales (azul), Cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa que existe una caída en entrada de partículas a esta distancia para los cambios en los campos geoelectricos y geomagnéticos. Sobre todo dada la presencia de cambio en campo geoelectrico. 29

1. Introducción

1.1. Rayos Cósmicos y Cascadas Aéreas Extensas (CAE)

Los rayos cósmicos son partículas que viajan a altas energías a través del espacio y que proceden desde distintas fuentes. En algún punto de su trayectoria, pueden ingresar a la atmósfera terrestre. En su mayoría, los rayos cósmicos se componen de protones y núcleos atómicos más pesados [2]. Para poder estudiar el comportamiento de estos rayos cósmicos, la física de altas energías depende enormemente de la capacidad de detección en la superficie terrestre. Cuando uno de estos rayos incidentes (a los que llamaremos **primarios**) interactúa con las componentes de la atmósfera terrestre, genera una serie de rayos de partículas derivadas (**secundarios**). A los conjuntos de rayos que se originan a través de estos mecanismos se les conoce como cascadas aéreas extensas (EAS por sus cifras en inglés). El producto final de la interacción atmosférica llega a la superficie terrestre y es por lo tanto detectable por instrumentos especializados en laboratorios en tierra.

Estas cascadas se originan por partículas que decaen a través de diferentes procesos llamados canales, los cuales se caracterizan por el tipo de partícula principal que se genera. Entre estos, el canal hadrónico, generalmente el núcleo de la cascada; el muónico, producto del decaimiento de piones cargados, entre otros; y el electromagnético, conformado por fotones y electrones producidos a partir de las diferentes interacciones de este tipo en la atmósfera [2]. Además, existe también la posible generación de ciertos tipos de radiación (Fluorescente, Cherenkov, etc.). Podemos ver un esquema de esto en la Figura 1.1. De estos, en la superficie terrestre, el canal más significativo para las mediciones es el canal electromagnético, seguido del muónico.

Dada la prominente presencia de partículas cargadas - como electrones, muones y sus respectivas

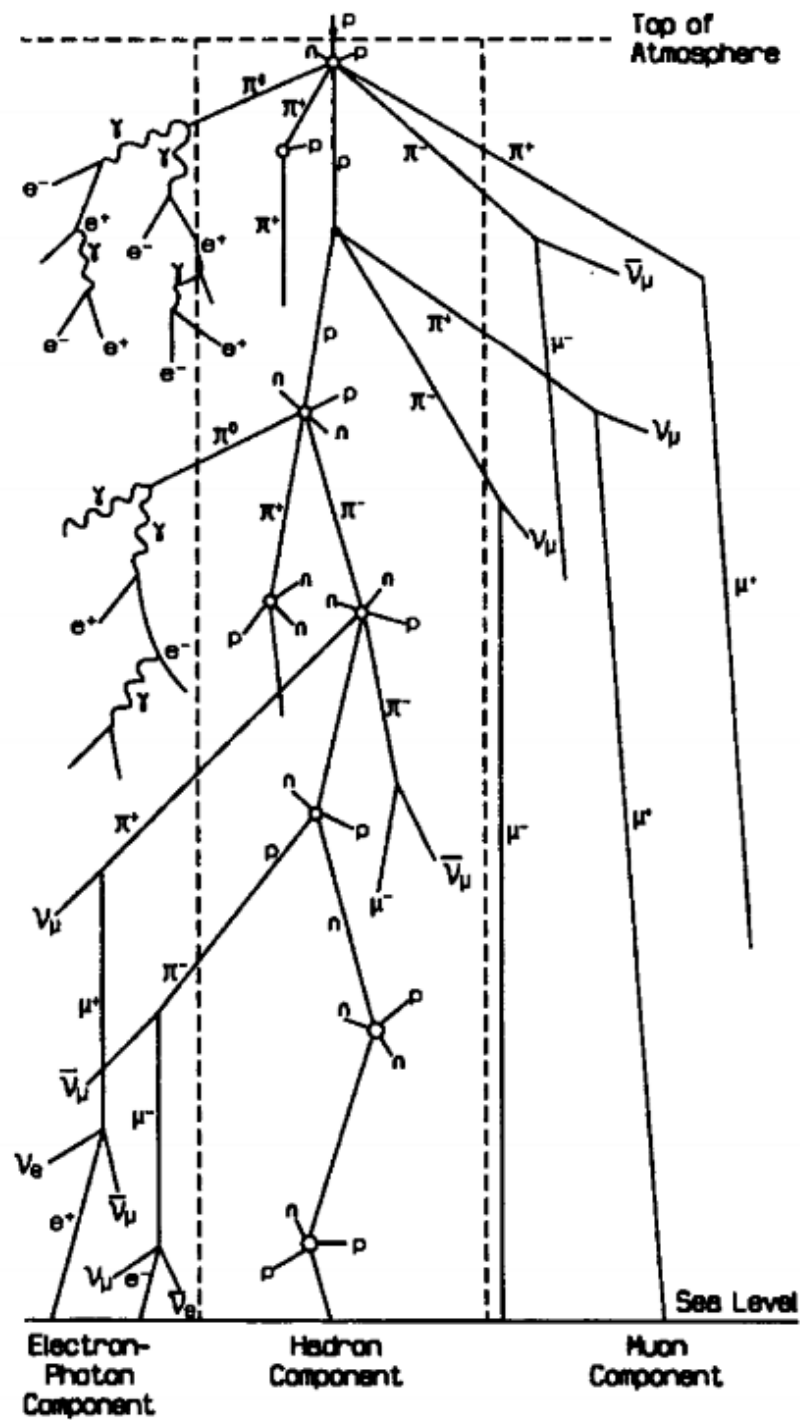


Figura 1.1: Esquema de desarrollo de una cascada producida por la entrada de un protón como primario. Se exagera la separación de los distintos componentes de la cascada por efecto de ilustración. Se añaden los neutrinos producidos en las interacciones por completitud [2]

anti-partículas - para la detección en la superficie, es bien conocido que la presencia de los campos geomagnético y geoelectrico naturales del planeta generan un efecto sobre la interacción electromagnética, la trayectoria de viaje y subsecuente detección de secundarios en nuestros instrumentos en superficie. Es importante tomar en cuenta los parámetros que caracterizan estos campos al momento de generar modelos y cómo su variación podría tener un impacto sobre la detección de secundarios en la superficie.

1.2. Actividad Sísmica y su efecto en los Campos Geoelectricos y Geomagnéticos

Existen una serie de estudios diferentes en los últimos años que señalan la relación posible entre la actividad sísmica en una región y una variación en las medidas de los campos eléctricos y magnéticos dentro de las zonas en las cuales ocurre la actividad sísmica. [3–9]. La mayor parte, si no son todos los estudios alrededor de este tema, toman como referencia la ocurrencia de terremotos y otros tipos de actividad sísmica bastante notoria dentro de la historia reciente. Por ejemplo, el terremoto en Japón en 2011 [10].

En un estudio en 2018 se analizó las variaciones geomagnéticas relacionadas con distintos eventos sísmicos para los cuales existen registros [11]. En este estudio se encontraron diferentes respuestas según los eventos analizados y siempre se observa un salto en el campo magnético vertical. En el caso de mayor magnitud, este salto es de aproximadamente $0,20 \mu\text{T}$.

Por otra parte, en un estudio de 2013, se analizó, en días de buen clima, la incidencia de campos eléctricos verticales como eventos precursores a la presencia de actividad sísmica [12]. Se encontró la incidencia de campos eléctricos verticales a la superficie de entre -0.457 y -1.38 kV/m como eventos precursores a movimientos sísmicos de magnitudes entre 4.8 y 7.8. Con estos resultados, es posible entonces determinar la posible forma de variaciones observables en presencia de actividad sísmica.

Por su geografía, Ecuador posee una alta incidencia de actividad sísmica y volcánica, ofreciendo así a los laboratorios locales las condiciones óptimas para el estudio continuo de esta relación, y sus subsecuentes efectos.

En este trabajo, la intención es aprovechar los modelos de interacción establecidos para realizar simulaciones de fluencia de partículas. Con ayuda de estas simulaciones, pretendemos analizar los efectos teóricos que los cambios en la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos en la atmósfera provocan sobre la detección secundarios en la superficie terrestre. Nos interesa, en particular, la detección a través de instrumentos en el laboratorio LEOPARD de la Universidad San Francisco de Quito, ubicada a 2200 m.s.n.m., siendo esta un región tropical. Estas simulaciones permitirán tener información a la cual referirse para la calibración de instrumentos y observación de anomalías en la detección de flujo de partículas. Por lo tanto, prevenir el atribuir estas anomalías a causas aleatorias o fenómenos ajenos, a la vez que descartar eventos incidentales.

Esto se logra generando simulaciones para analizarlas bajo tres condiciones diferentes: (1) Bajo condiciones regulares sobre la ciudad de Quito; (2) una en la cual la intensidad de campo magnético vertical ha sido variado con respecto a la base; y (3) una en la cual la intensidad de campo eléctrico vertical ha sido variado de manera similar. La magnitud de variación de estos parámetros está basada en estudios relevantes.

2. El Observatorio Latinoamericano Gigante

2.1. Colaboración LAGO

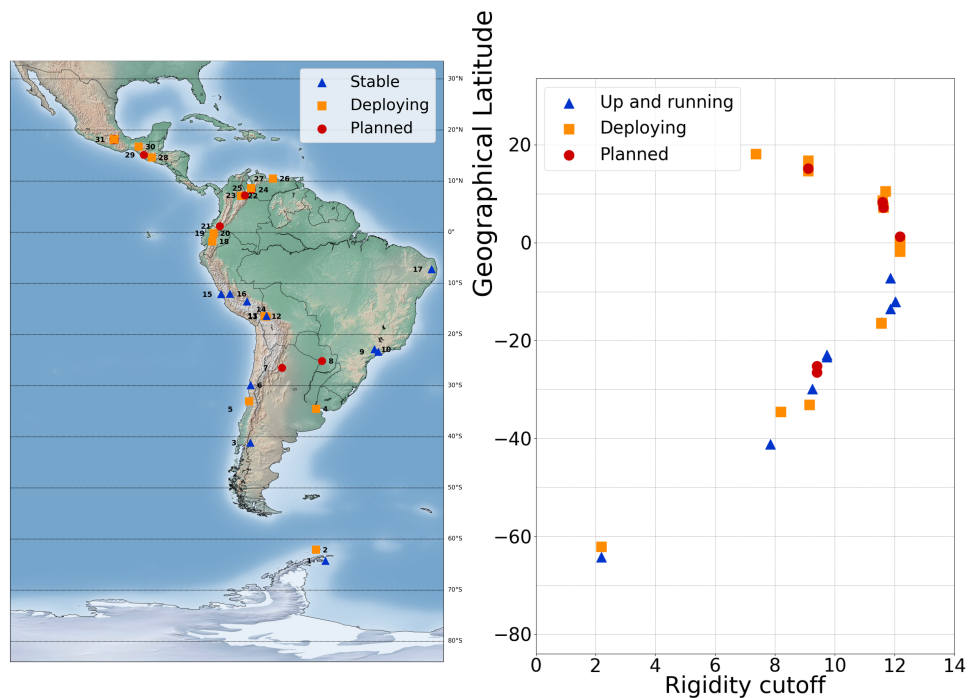


Figura 2.1: Mapa de sitios de LAGO en el continente, y rigidez de corte para cada uno de los sitios. Figura creada a partir del código en [1]. Detalle de las ubicaciones en el apéndice A.

El proyecto LAGO (Latin American Giant Observatory) [13,14] es un proyecto pensado y diseñado para estudiar la naturaleza de eventos de rayos cósmicos a altas energías, como aquellos producidos por brotes de rayos gamma (GRB), al igual que el clima espacial y el flujo de entrada de rayos cósmicos en relación a distintos fenómenos atmosféricos, además de promover la educación y el desarrollo en América Latina de la física de altas energías [15]. Estos objetivos se logran mediante la colaboración LAGO, una red de científicos e institutos latinoamericanos que manejan el funcio-

namiento del proyecto en sus diferentes aspectos y se encargan de la instalación y manutención de instrumentos de detección, el análisis de datos, y el reporte de resultados.

2.2. Detectores LAGO

La colaboración LAGO en América latina se expande a lo largo de alrededor de 20 ciudades entre Argentina, Bolivia, Brazil, Guatemala, Colombia, Ecuador, México, Perú y Venezuela (Figura 2.1) [1]. La Colaboración aprovecha la geografía de la región para colocar sitios de detección extendidos a lo largo del continente y a diferentes altitudes, aprovechando los sitios altos en cordilleras como los Andes para colocar detectores que puedan estudiar fenómenos de muy altas energías. Por su puesto, es importante tener en cuenta las características del sitio donde se colocan los detectores al momento de operarlos e interpretar datos, al igual que para realizar simulaciones de detección.

Los detectores de los sitios de LAGO consisten en detectores de agua Cherenkov (WCD) formados por tanques plásticos llenos de entre $1 m^3$ a $40 m^3$ de agua purificada, recubiertos en el interior por un material altamente reflectivo y un tubo foto-multiplicador (PMT). Cuando una partícula ultra-relativista atraviesa el agua dentro del tanque, emite radiación Cherenkov, que se refleja dentro del tanque y se recolecta en el PMT, generando así una señal eléctrica que se detecta [16, 17]. El sistema además está diseñado para que los materiales base sean de bajo costo y fácilmente accesibles en el mercado dentro de cualquiera de los países miembros de la Colaboración.

En Ecuador, hay tres instituciones que forman parte de la Colaboración LAGO. Cada una en alguna fase de instalación de un tanque de detección: El tanque *Politanque* en La Escuela Politécnica Nacional (EPN), a 2817 m.s.n.m; El tanque *Chimbitito* en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)(Figura 2.2 [18]), a 2794 m.s.n.m; y el tanque *Panchito* en la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), a 2200 m.s.n.m. [19]



Figura 2.2: WCD instalado en Riobamba, Ecuador (2784 m.s.n.m.). Se muestra el tanque además de el tubo foto-multiplicador y su soporte

2.3. Simulaciones de Fluencia

Parte de las actividades dentro del proyecto LAGO es el realizar simulaciones de flujo de secundarios, con el propósito de calibrar y preparar los equipos para mediciones en los diferentes sitios, además de estudiar posibles efectos detectables. Dentro de LAGO se utiliza el paquete de CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade) [20] para generar las simulaciones de cascadas aéreas externas iniciadas por rayos cósmicos. El código simula las interacciones con la atmósfera según modelos preestablecidos. Dentro de LAGO se utilizan los modelos de interacción QGSJETII-04 y GHEISHA 2002d para interacciones de altas y bajas energías respectivamente. Adicionalmente, CORSIKA ofrece las opciones para configurar las simulaciones según sea necesario.

La colaboración, además, ha desarrollado el paquete de Simulaciones ARTI [21]. Este software reúne una serie de códigos e instrucciones para generar simulaciones en CORSIKA diseñadas para tiempos extendidos de fluencia específicos, tomando como parámetros el rango de ángulos de entrada, de energías, el modelo atmosférico, la altura sobre el nivel del mar del sitio, y las componentes de campo geomagnético, obtenibles de bases de datos públicas. Con esta información, ARTI genera *scripts* de CORSIKA de diferentes primarios típicos para una hora de fluencia con los parámetros establecidos. El estándar para simulaciones significativas dentro de la colaboración LAGO es de una hora de fluencia. Computacionalmente, correr estos archivos para una hora de fluencia es costoso y se recomienda realizar las simulaciones dentro de clusters de computación de alto rendimiento para obtener los resultados.

En lo que sigue, usaremos las capacidades de los códigos existentes para estudiar como variarían las simulaciones de fluencia al variar los parámetros de campo magnético y eléctrico dentro del código de simulación de CORSIKA considerando como base las condiciones típicas en la ciudad de Quito, particularmente en el detector que se ubicaría en la Universidad San Francisco de Quito (2200 m.sn.m).

3. Simulaciones en CORSIKA

A continuación vamos a analizar los resultados de dos conjuntos de simulaciones de rayos cósmicos. En primer lugar, simulaciones de la entrada de un único protón como primario. El propósito de esto es analizar la influencia a nivel de detección de los cambios en los campos geoelectrónicos y geomagnéticos para un primario simple. El segundo conjunto concierne simulaciones de una hora de fluencia generada con el paquete ARTI, el estándar dentro de LAGO para tener una muestra significativa sobre la cual estudiar los efectos de las variaciones que pretendemos estudiar.

Los parámetros que consideramos para estas simulaciones son la altitud del detector, 2200 m.s.n.m. para la ubicación de la USFQ. Para la simulación de protones, consideramos las condiciones de campo magnético del 6 de junio de 2019: $B_x = 11,05\mu\text{T}$, $B_z = 4,13\mu\text{T}$ [22]. Mientras que para las simulaciones de una hora de fluencia se considera las condiciones de campo magnético de 13 de Noviembre de 2020: $B_x = 11,031\mu\text{T}$, $B_z = 4,081\mu\text{T}$ [22]. Además, para la fluencia de una hora tomamos entradas de todos los ángulos de entrada y todo el rango de energías permitido (5 GeV, 1000000 GeV).

Para la variaciones en los campos geoelectrónicos y geomagnéticos, hemos tomado en cuenta estudios relevantes. Hemos tomado en cuenta un cambio de orden de $0.25\mu\text{T}$ para el campo magnético vertical, como un valor que se encuentra cerca del límite superior de la magnitud de cambio observable [11]. Adicionalmente, para el cambio de campo eléctrico vertical, tomamos en cuenta un cambio de magnitud 10 V/cm que se encuentra cerca del centro del rango observado en ciertos eventos sísmicos [12]

3.1. Cascadas iniciadas por un único protón

En esta sección, mostramos las distribuciones laterales de secundarios a nivel del detector (2200 m.s.n.m.) (Figura 3.1) para una cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV. El centro (0,0) de las coordenadas coincide con el centro geométrico del detector. Se observa que para un primario con tal energía, los fotones llegan a dispersarse hasta un radio de 4 km. Vemos tres distribuciones, una en condiciones típicas, una con las mismas condiciones más un cambio en el campo magnético vertical variado por $-0.25 \mu\text{T}$ y la tercera muestra un cambio de -10 V/cm en campo eléctrico vertical. Además de estos cambios, todas las condiciones se mantienen iguales. Vemos que para los cambios en campos magnéticos y eléctricos verticales, existen diferencias perceptibles en la distribución en el suelo producto de los cambios en estos parámetros.

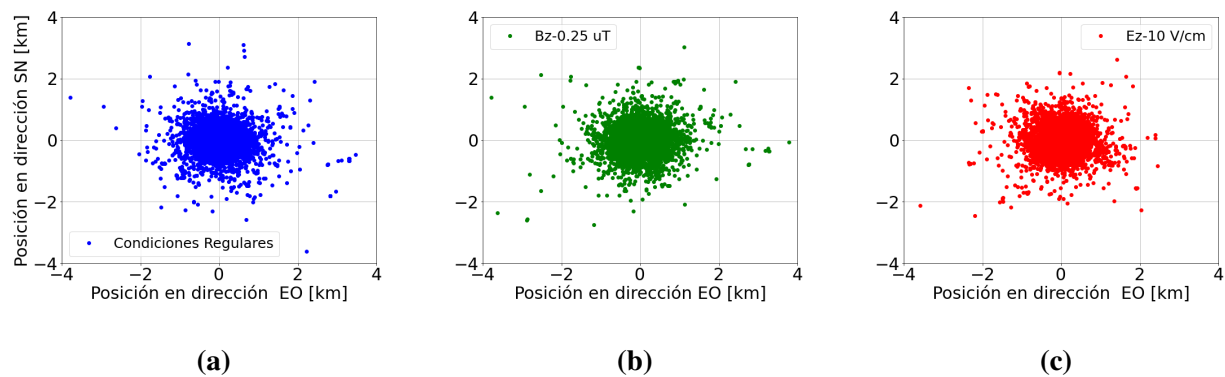


Figura 3.1: Distribución en el suelo a nivel del detector (2200 m.s.n.m.) de partículas secundarias resultado de la simulación de una cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV. (a) Condiciones Regulares ($E_x = 0$, $E_z = 0$, $B_x = 11,05\mu\text{T}$, $B_z = 4,135\mu\text{T}$) (b) Cambio en campo Magnético vertical indicado por $B_z - 0,25\mu\text{T}$. (c) Cambio en campo eléctrico vertical indicado por $E_z - 10\text{V/cm}$. Notamos ciertas diferencias en la forma de las distribuciones en la presencia de estos cambios.

Además, en el Cuadro 3.1 se destacan los números de partículas predichas a nivel del detector por tipo de las componentes electromagnéticas y muónicas de la cascada. Se nota como los números varían claramente al variar las condiciones. Estos resultados se reflejan en la Figura 3.2, donde vemos los secundarios de la componente electromagnética de la cascada (fotones, electrones y positrones). Se observan conductas similares en todas las distribuciones. Principalmente, notamos que alcanza un máximo a cierta distancia del centro, a partir de la cual la distribución disminuye dramáticamente. Adicionalmente, vale la pena notar que confirmamos un aumento en el número de partículas al nivel del detector en ambos casos de variaciones de campos eléctricos y magnéticos con la misma forma de la distribución.

Cuadro 3.1: Número de partículas a nivel del detector clasificadas por tipo en las distintas condiciones de cambio de campos geoelectrónicos y geomagnéticos consideradas para una cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV.

Tipo de Partícula	Cond. Normales	Cambio en B_z	Cambio en E_z
Fotones	20666	29472	41174
Electrones	1391	2034	3080
Positrones	710	1120	1730
Antimuones	116	98	83
Muones	117	99	87

De estos resultados, podemos notar que existe un efecto a nivel del detector al usar los modelos provistos con parámetros diferentes para los campos geoelectrónicos y geomagnéticos. Sin embargo, en el detector en realidad detectamos la llegada de un conjunto de secundarios provenientes de varios primarios simultáneamente. Es necesario realizar una simulación de una muestra significativa para poder llegar a conclusiones apropiadas. Con este propósito, el paso siguiente será realizar las simulaciones de una hora de fluencia de rayos cósmicos y variar los parámetros de los campos electromagnéticos de manera similar a lo que hemos realizado en esta sección. De esta forma, mejor determinar el comportamiento en la detección al variar parámetros.

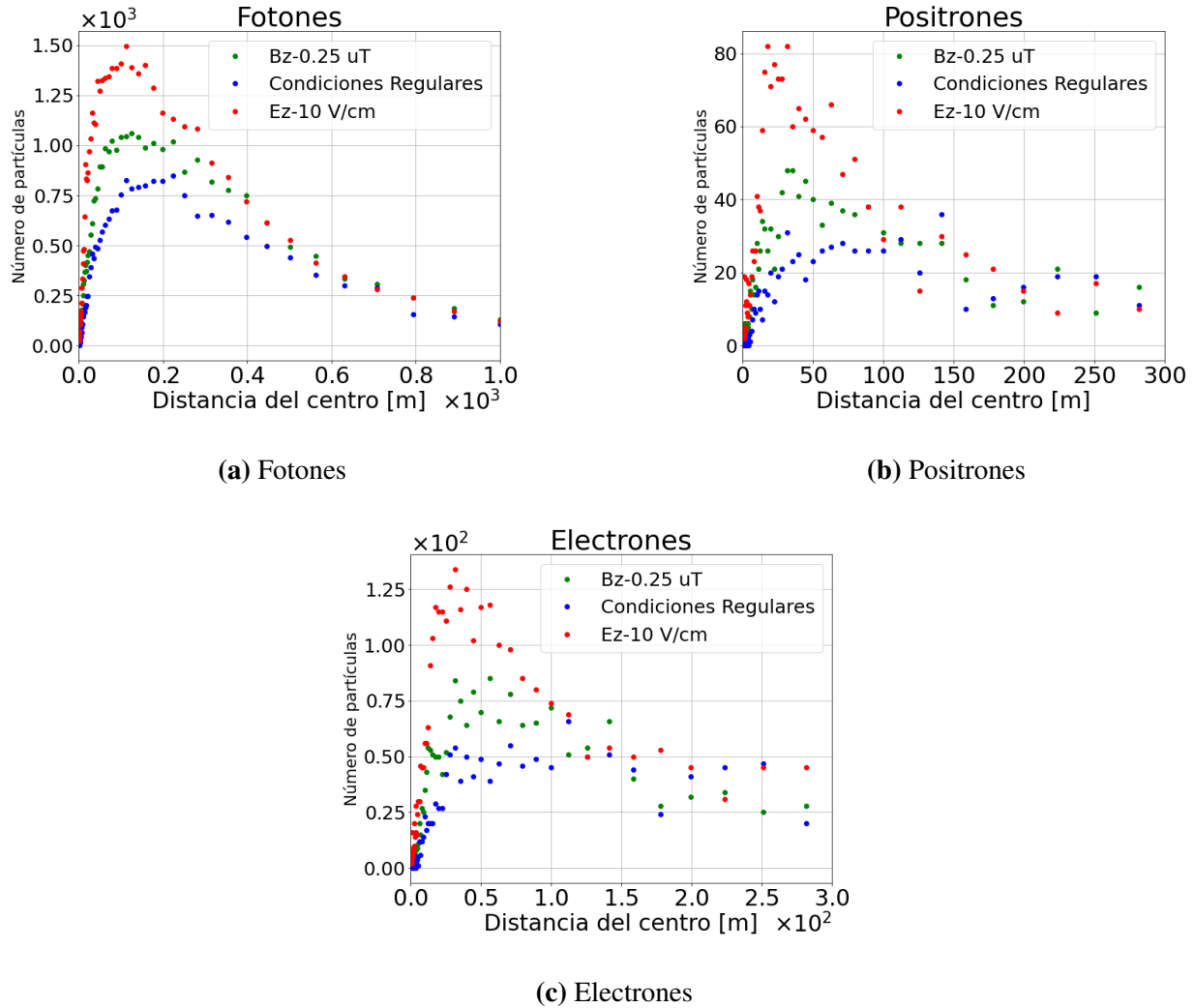


Figura 3.2: Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m.) con respecto a la distancia absoluta a la posición del detector (0,0) de los diferentes tipos de partículas de la componente electromagnética de la cascada iniciada por un protón de 10^4 GeV. Condiciones normales (azul), Cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa similitudes en la forma de las distribuciones, notando que aumenta la entrada de partículas para los cambios en campos geoelectricos y geomagnéticos. Con particular diferencia en la distribución con cambio en campo eléctrico.

3.2. Simulación de Una Hora de Fluencia

En lo que sigue, mostramos los resultados de las simulaciones de secundarios a nivel del detector (2200 m.s.n.m.) (Figura 3.3) para un conjunto de cascadas correspondientes a una hora de fluencia (3600 s) de rayos cósmicos. Las simulaciones se generan a través del paquete de simulaciones ARTI. Los 3 conjuntos son idénticos en los parámetros de entrada, a excepción de los cambios en campos geomagnéticos y geoelectrónicos. La variación de los campos se realiza de manera similar a la sección anterior, partiendo de diferentes valores iniciales correspondientes a los valores conocidos para el 13 de Noviembre de 2020.

Además, se simulan las energías en un rango entre 5 y 10^6 GeV, con todos los posibles ángulos de entrada para los primarios. Se simularon en total 18738418 primarios en cada caso. Entre estos encontramos protones en su mayoría, además de núcleos de Helio, y elementos mas pesados como Litio, Carbono y Oxígeno. El centro (0,0) de las coordenadas en las distribuciones coincide con el centro geométrico del detector que se colocaría.

Para realizar estas simulaciones, notamos que va a ser necesaria una gran cantidad de recursos computacionales. Como sugerimos, lo mejor es tener acceso a un clúster para computación de alto rendimiento. Para solucionar esto, utilizamos la plataforma de Google Cloud, dentro de la cual creamos un clúster Kubernetes, es decir, un clúster dedicado a orquestar trabajos de aplicaciones contenerizadas dentro de un conjunto de instancias de maquinas ya sean virtuales o reales. Por ende, desarrollamos nuestras simulaciones para funcionar como aplicaciones contenerizadas y disponibles a través de Docker Hub [23]. Una vez listas, estas fueron ejecutadas dentro de un clúster de Kubernetes en Google Cloud, con la ayuda del código Argo para flujos de trabajo en Kubernetes.

Se observa que para una hora de fluencia, las partículas tienden a dispersarse en un radio de 8 km. Vemos que para los cambios en campos magnéticos y eléctricos verticales, existen ciertas dife-

rencias perceptibles en la distribución que podía ser posible percibir en la distribución en el suelo producto de los cambios en estos parámetros. Aun así, las variaciones que se observan podrían atribuirse a diferencias aleatorias en el proceso de la cascada. Entonces vale la pena observar de otras formas las distribuciones.

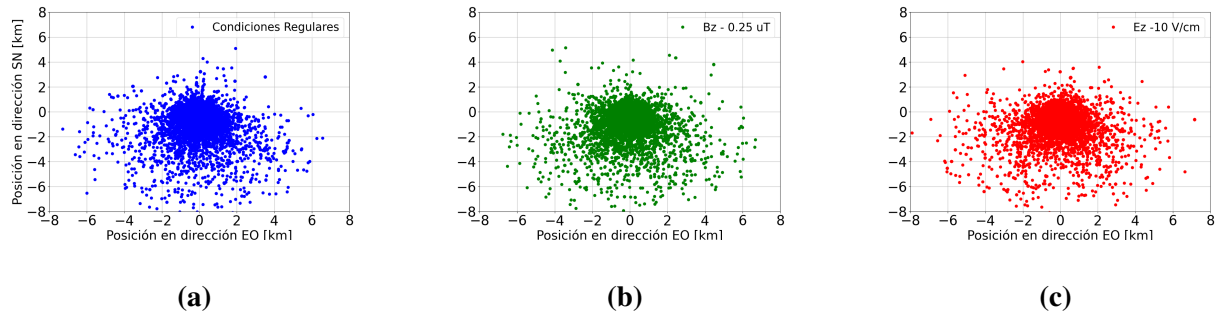


Figura 3.3: Distribución en el suelo a nivel del detector (2200 m.s.n.m) de partículas secundarias resultado de la simulación realizada para una hora de fluencia de partículas primarias. (a) Condiciones Regulares ($E_x = 0$, $E_z = 0$, $B_x = 11,031\mu T$, $B_z = 4,081\mu T$). (b) Cambio en campo Magnético vertical $B_z - 0,25\mu T$. (c) Cambio en campo eléctrico vertical $E_z - 10V/cm$. Es posible notar ciertas diferencias en las formas de la distribuciones entre los tres casos.

Además, en la tabla 3.2 se destacan los números de partículas predichas a nivel del detector por tipo de las componentes electromagnéticas y muónicas de la cascada. Se nota como los números cambian al alterar las condiciones. Sin embargo, la proporción en la que estos varían con respecto al número es bastante pequeña. Hace falta entonces visualizar estos resultados de una manera más apropiada. Esto se refleja en la Figura 3.4, donde vemos los secundarios de la componente electromagnética y muónica de la cascada (fotones, electrones y positrones).

Notamos que, dada la fluencia de una hora de partículas, las diferencias entre distribuciones son difíciles de percibir en la proporción a la distribución de partículas. Dado que nos interesa sobre todo la detección cerca del detector, vamos a observar el número de partículas a una distancia más cercana al cero de la distribución (Figura 3.5).

Cuadro 3.2: Número de partículas a nivel del detector clasificadas por tipo en las distintas condiciones de cambio de campos geoelectrónicos y geomagnéticos considerada por de una hora de fluencia de entrada de primarios

Tipo de Partícula	Condiciones Normales	Cambio en B_z	Cambio en E_z
Fotones	5823238	5750310	5599911
Electrones	407726	401536	388231
Positrones	225803	223038	217107
Antimuones	580034	580156	580025
Muones	502951	503855	502100

Se observa que a distancia más corta al detector, la diferencia entre las distribuciones es mucho más notoria para la componente electromagnética. Sobre todo, hay una caída en la distribución de entrada de partículas en esta sección de la distribución mucho más clara en el caso del cambio en campo eléctrico vertical. Esta es justamente la sección que consideramos se encuentra en la región cercana al detector y por lo tanto, la que sería posible observar y analizar. Por otra parte, la distribución de la componente muónica de la cascada exhibe un comportamiento un poco más aleatorio y por lo tanto no muestra realmente una diferencia perceptible.

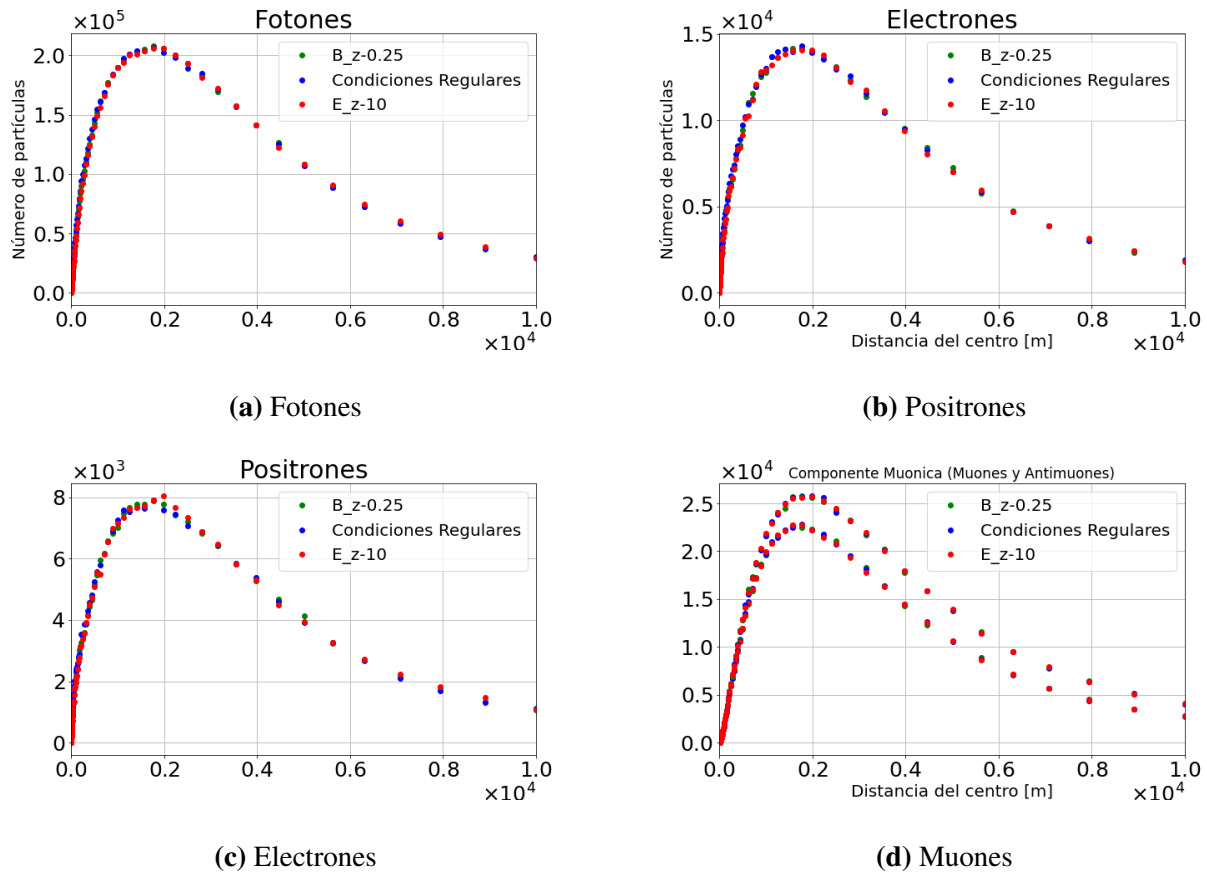


Figura 3.4: Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m.) con respecto a la distancia absoluta a la posición del detector (0,0) de los diferentes tipos de partículas secundarias de las componentes electromagnética y muónica simuladas para una hora de fluencia. Condiciones normales (azul), cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa similitudes en la forma de las distribuciones, no se observa un cambio claro entre las formas de la distribución. Si este existe, es muy pequeño en proporción con la distribución completa.

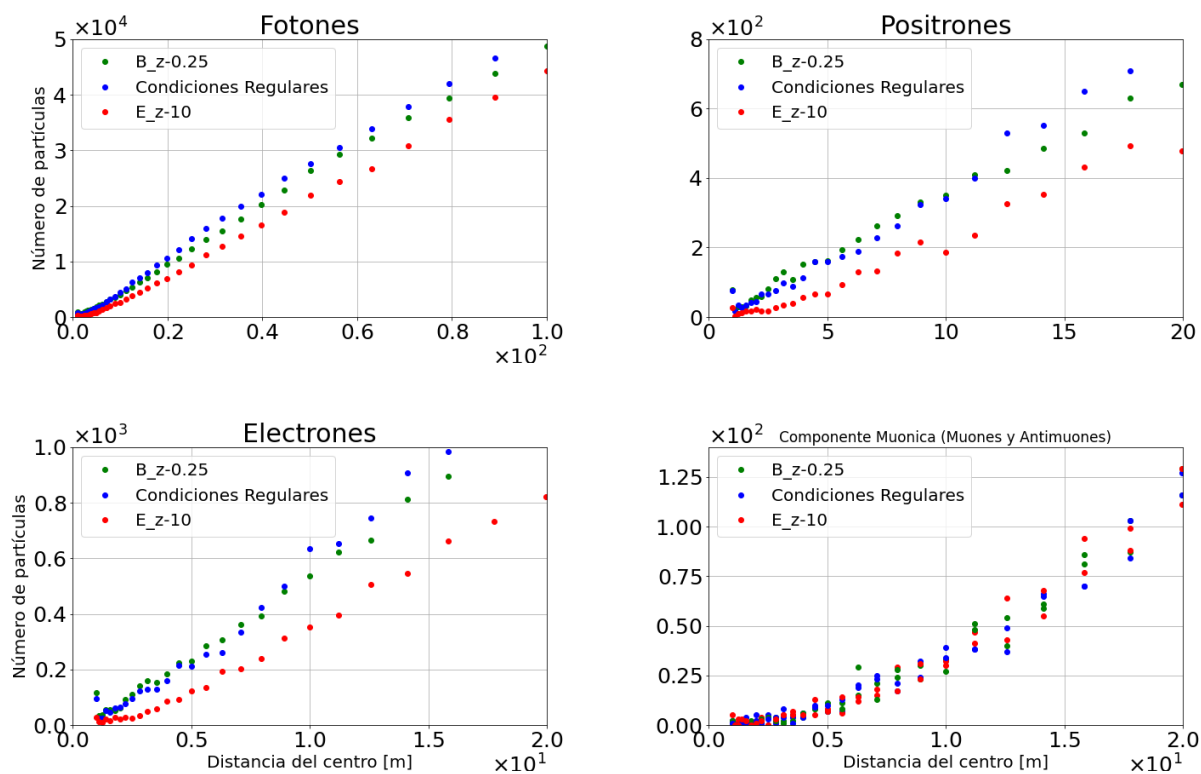


Figura 3.5: Distribución de número de partículas secundarias en el suelo (2200 m.s.n.m) y en la vecindad del detector que se encontraría en la posición (0,0). Considerando las diferentes partículas parte de la comporte electromagnética y muónica simuladas para una hora de fluencia de primarios de diferente tipo. Donde tenemos: Condiciones normales (azul), Cambio en campo magnético (verde) y cambio en campo eléctrico (rojo). Se observa que existe una caída en entrada de partículas a esta distancia para los cambios en los campos geoelectrónicos y geomagnéticos. Sobre todo dada la presencia de cambio en campo geoelectrónico.

4. Conclusiones

Los Resultados obtenidos para las simulaciones de entrada de un único protón de $10^4 [Gev]$ muestran que, en efecto, los modelos actuales manejados por las simulaciones de CORSIKA estándar para la colaboración LAGO reflejan una variación en la detección de partículas secundarias a nivel del detector cuando se varían los parámetros de campos eléctricos y magnéticos terrestres. Vale la pena notar que el cambio en campo eléctrico genera un efecto más fuerte que el cambio en campo magnético. Incluso casi duplicando el número de fotones y electrones en el suelo.

Estos resultados nos muestran que los modelos predicen que la incidencia de actividad sísmica en cierta región podría reflejar un resultado en un detector de secundarios. Sin embargo, la simulación de un único protón no es suficiente para llegar a conclusiones representativas acerca de la detección.

Por otra parte, los resultados de la simulación de una hora de fluencia nos muestran resultados más significativas del comportamiento esperado en la detección. Los resultados muestran que en efecto existe un cambio en el número de partículas que llegan al nivel del detector. Empero, a diferencia del caso del protón, la proporción de cambio es mucho menor con respecto al número total. Aún así, cerca del centro geométrico del detector, principalmente para el cambio en campo eléctrico vertical, esta proporción será mucho más representativa, permitiendo la posibilidad de detectar este cambio usando un detector de agua Cherenkov.

Es interesante notar que el mayor efecto es obtenido en la variación de campo eléctrico, recordando que para la magnitud de cambio en campo eléctrico tomamos un valor típico. Mientras que, para la variación en campo magnético, tomamos un valor bastante alto. Debemos destacar también que la magnitud de cambio del campo magnético que utilizamos basados en la literatura [11] es un cambio de una proporción relativamente pequeña al campo geomagnético ya existente. Por otra

parte, el cambio en campo eléctrico es de una magnitud absoluta, ya que se considera que este es cercano al cero en condiciones sin perturbar. y cambia de manera súbita a $-10 [V/cm]$ con un desfase de algunas horas con respecto al evento telúrico [12].

Sin embargo, para poder llegar a conclusiones definitivas de las desviaciones que se pueden esperar en la presencia de actividad sísmica dadas esta clase de simulaciones, es necesario simular de manera apropiada un detector de agua Cherenkov, su geometría, y la interacción con las partículas en el suelo simuladas por CORSIKA. Dentro de LAGO, el estándar es realizar las simulaciones con el código de Geant4. Este sería el siguiente paso importante a realizar con los datos en un estudio como este.

Existen distintos mecanismos en las diferentes subrutinas de CORSIKA que podrían justificar el cambio al momento de existir la variación en los campos. En este estudio no nos enfocamos en esto, pero nos complace a llegar a una explicación simple. La presencia de los campos geoelectrónicos y geomagnéticos afectan tanto la trayectoria como las interacciones electromagnéticas en el desarrollo de la cascada. Principalmente, recordamos que para una partícula cargada, un campo magnético genera únicamente una curvatura en su trayectoria. Mientras que un campo eléctrico genera una aceleración en la dirección del campo. Una partícula cargada acelerada perderá energía en forma de radiación, la cual puede resultar en distintos procesos, como producción de pares, que llevarán a una pérdida más rápida de la componente electromagnética de la cascada.

Vale la pena además decir que el campo de estudio de la relación entre la actividad sísmica y la variación en campos geoelectrónicos y geomagnéticos es un área que aún se encuentra en constante trabajo y desarrollo. No hay aún conocimiento de los mecanismos que caracterizan esta relación. Falta aún explorar más cómo se relacionan la intensidad del sismo y la magnitud de cambio en los campos, además del desfase temporal entre ambos eventos. Una vez que se entiendan mejor estos mecanismos, será posible plantear de mejor forma estudios experimentales para analizar la conexión entre los dos tipos de eventos en el campo.

Finalmente, para poder estudiar estos mecanismos, es importante realizar estos estudios con aparatos calibrados apropiadamente para detectar los efectos producidos. Un detector de Agua Cherenkov de partículas provee una oportunidad de detección relativamente simple y de bajo costo. Esto será principalmente útil en una región sísmicamente activa como el Ecuador y el resto de la cordillera de los Andes en América Latina. Además, el detector sirve simultáneamente a los propósitos de la colaboración LAGO como el estudio del clima espacial y la detección de eventos de altas energías como brotes de rayos gama.

Bibliografía

- [1] lagoproject. Mapa con las estaciones de lago. <https://github.com/lagoproject/locationsMaps>.
- [2] Otto Claus Allkofer and Peter Karl Grieder. *Cosmic rays on earth*. Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik Karlsruhe, 1984.
- [3] O. Molchanov, E. Fedorov, Alexander Schekotov, E. Gordeev, V. Chebrov, V. Surkov, A. Rozhnoi, Stanislav Andreevsky, Dmitry Iudin, S. Yunga, A. Lutikov, Masashi Hayakawa, and P. Biagi. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4, 11 2004.
- [4] Marin Cavelis and Branislav Glavatovic. Possible new phenomenon in the atmosphere electric field intensity variations that is caused by the strong earthquake occurrences. 02 2019.
- [5] M. Hayakawa, J.P. Raulin, Y. Kasahara, F. C. P. bertonni, Y. Hobara, and W. Guevara-Day. Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 haiti earthquake, as based on medium-distance subionospheric vlf propagation data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 02 2011.
- [6] H. Fujiwara, M. Kamogawa, M. Ikeda, J. Y. Liu, H. Sakata, Y. I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y. J. Chuo, and Y. H. Ohtsuki. Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences. *Geophysical Research Letters*, 31(17), 2004.
- [7] Masashi Hayakawa, Katsumi Hattori, and Kenji Ohta. Monitoring of ulf (ultra-low-

- frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. *Sensors*, 7(7):1108–1122, Jul 2007.
- [8] Yukio Fujinawa, Kozo Takahashi, Yoichi Noda, Hiroshi Iitaka, and Shinobu Yazaki. Remote detection of the electric field change induced at the seismic wave front from the start of fault rupturing. *International Journal of Geophysics*, 2011, 07 2011.
- [9] M. Parrot. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects. *Advances in Space Research*, 15(11):27 – 35, 1995. Natural Hazards: Monitoring and Assessment Using Remote Sensing Technique.
- [10] Yuri Kopytenko, Valery Ismaguilov, Katsumi Hattori, and Masashi Hayakawa. Anomaly disturbances of the magnetic fields before the strong earthquake in japan on march 11, 2011. *Annals of Geophysics*, 55(1), 2012.
- [11] Enrique G. Cordaro, Patricio Venegas, and David Laroze. Latitudinal variation rate of geomagnetic cutoff rigidity in the active chilean convergent margin. *Annales Geophysicae*, 36, 03 2018.
- [12] Abhijit Choudhury, Anirban Guha, Barin De, and Rakesh Roy. A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast india. *Annals of Geophysics*, 56(3):0331, 2013.
- [13] LAGO Project. The latin american giant observatory (lago).
- [14] Iván Sidelnik and Hernán Asorey. Lago: The latin american giant observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 876:173 – 175, 2017. The 9th international workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2016).

- [15] H. Asorey, R. Mayo-García, L.A. Núñez, M. Rodríguez-Pascual, A. J. Rubio Montero, M. Suarez-Durán, and L.A. Torres-Niño. The Latin American Giant Observatory: a successful collaboration in Latin America based on Cosmic Rays and computer science domains. 2016.
- [16] Iván Sidelnik. The Sites of the Latin American Giant Observatory . *PoS, ICRC2015:665*, 2016.
- [17] M. Sofo Haro and L.H. Arnaldi for the LAGO Collaboration. The data acquisition system of the latin american giant observatory (lago). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 820:34 – 39, 2016.
- [18] Mario Audelo, Diego Barahona, Pedro Cadena, Edgar Carrera Jarrin, Dennis Cazar Ramírez, Mary Castro, Magdy Echeverria, Jenny Orbe, Celso Recalde, Rommel Suarez, Talia Tene, Nicolas Vasquez, and FOR COLLABORATION. Implementing a WCD detector system in Riobamba (Ecuador) as part of the LAGO Project. 07 2013.
- [19] C. Mantilla, M. Audelo, M. Calderon, E. Carrera, D. Cazar, O. Martinez, R. Quishpe, S. Vargas, and N. Vasquez. Implementing a wcd detector system in ecuador as part of the lago project. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267-269:430 – 432, 2015. X Latin American Symposium of High Energy Physics.
- [20] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. 2 1998.
- [21] H. Asorey. The lago crktools suite. <https://github.com/lagoproject/arti>.
- [22] National Geophysical Data Center.

- [23] D.A. Coloma. dacb1997/tesisdeployers. <https://hub.docker.com/repository/docker/dacb1997/tesisdeployers>.

Anexo A. Tabla de Ubicaciones de LAGO

Cuadro A.1: Tabla de Ubicaciones de LAGO, con parámetros de la ubicacion. [1]

Pais	ALT	LAT	LONG	STATUS	Ru	Rc	RI
Marambio	200.0	-64.24	-56.62	uprunning	2.19	2.19	2.19
Machu Picchu	10	-62.09	-58.47	ongoing	2.19	2.19	2.19
Bariloche	850.0	-41.15	-71.3	uprunning	7.84	7.84	7.84
Buenos Aires	10.0	-34.54	-58.44	ongoing	8.19	8.19	8.19
VinaDelMar	347	-33.07	-71.55	ongoing	9.15	9.15	9.15
La Serena	28	-29.90	-71.25	uprunning	9.25	9.25	9.25
Tucuman	430	-26.50	-65.11	planned	9.40	9.40	9.40
Asuncion-Paraguay	136	-25.19	-57.30	planned	9.40	9.40	9.40
Sao Paulo-UFABC	760	-23.38	-46.31	uprunning	9.73	9.73	9.73
Campinas	640	-22.9	-47.06	uprunning	9.73	9.73	9.73
La Paz	3630	-16.49	-68.15	ongoing	11.55	11.55	11.55
Cota cota(bo)	3917	-16.41	-68.5	ongoing	11.55	11.55	11.55
Chacaltaya	5240.0	-16.35	-68.13	uprunning	11.55	11.55	11.55
Cusco	3400.0	-13.52	-71.96	uprunning	11.86	11.86	11.86
Lima	150.0	-12.1	-77.02	uprunning	12.03	12.03	12.03
Huancayo	3370.0	-12.04	-75.3	uprunning	12.03	12.03	12.03
Campina Grande	550	-7.23	-35.88	uprunning	11.86	11.86	11.86
Riobamba-ESPOCH	2750	-1.81	-78.74	ongoing	12.18	12.18	12.18
Quito-EPN	2850	-0.2	-78.5	ongoing	12.18	12.18	12.18
Quito-USFQ	2200	-0.2	-78.5	ongoing	12.18	12.18	12.18
Pasto	2530	1.21	-77.27	planned	12.18	12.18	12.18
Bucaramanga	956.0	7.14	-73.12	ongoing	11.63	11.63	11.63
Pamplona	2342	7.22	-72.39	planned	11.63	11.63	11.63
Pico Espejo-ULA	4700	8.32	-71.03	planned	11.60	11.60	11.60
Merida-ULA	1893.0	8.63	-71.15	ongoing	11.60	11.60	11.60
Caracas-UCV	900.0	10.49	-66.89	ongoing	11.69	11.69	11.69
Caracas-USB	900.0	10.49	-66.89	ongoing	11.69	11.69	11.69
Guatemala	1490.0	14.63	-90.59	ongoing	9.11	9.11	9.11
Tacana	4060	15.13	-92.11	planned	9.11	9.11	9.11
Chiapas	522	16.75	-93.12	ongoing	9.11	9.11	9.11
Sierra Negra	4550.0	18.16	-97.95	ongoing	7.36	7.36	7.36