

## ESTUDIO ANALÍTICO-SIMULADO DE LA EFICIENCIA DE DISPARO DEL ARREGLO SUPERFICIAL DE DETECTORES DEL EXPERIMENTO ALPACA

### STUDY OF THE TRIGGER EFFICIENCY OF A SURFACE ARRANGEMENT OF DETECTORS FOR THE ALPACA PROJECT USING SIMULATIONS AND ANALYTICAL METHODS

CARLA A. CALLE GARCÍA & HUGO M. RIVERA BRETEL

Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635  
La Paz - Bolivia

(Recibido 22 de mayo de 2018; aceptado 5 de octubre de 2018)

#### RESUMEN

El experimento ALPACA (Andes Large area PARTICle detector for Cosmic ray physics and Astronomy) es un proyecto científico cuyo objetivo principal es la determinación del origen de los rayos cósmicos galácticos. El arreglo experimental consistirá de 401 detectores de centelleo a nivel de superficie y 8 piscinas de agua subterráneas que actuarán como detectores de muones tipo Cherenkov. El proyecto será puesto en marcha cerca del monte Chacaltaya, en el Cerro Estuquería a 4740 m sobre el nivel del mar (m s.n.m). En este trabajo se hizo un estudio analítico de la eficiencia de disparo del arreglo de superficie utilizando chubascos atmosféricos generados con simulaciones de Monte Carlo para tres tipos de partículas primarias: protones, núcleos de hierro y rayos gamma. Se consideraron energías entre  $10^{12,00}$  y  $10^{15,25}$  eV con ángulos cenitales entre 0 y 47 grados. Se encontró que el arreglo de superficie es 100% eficiente para la detección de los tres tipos de partículas primarias consideradas con energías superiores a la energía de saturación  $E_{sat} = 10^{14,25}$  eV, independientemente de su dirección de llegada, energía y posición del centro del chubasco sobre el arreglo de los detectores.

Código(s) PACS: 96.40.z — 96.40.Pq — 95.55.Vj

*Descriptor:* Rayos cósmicos — Chubascos atmosféricos — detectores de partículas

#### ABSTRACT

The ALPACA (Andes Large area Particle detector for Cosmic ray physics and Astronomy) experiment is a scientific project whose main objective is the determination of the origin of galactic cosmic rays. The project is in the planning stage and its experimental array will consist of 401 surface level scintillation detectors and 8 underground water pools that will act as Cherenkov muon detectors. The experiment will be set up near the mountain Chacaltaya, on Cerro Estuquera at 4740 m above sea level (m a.s.l). We have studied the trigger efficiency of the surface detector array using extensive air showers generated with Monte Carlo simulations for three types of primary cosmic rays: protons, iron nuclei and gamma rays. Energies between  $10^{12,00}$  and  $10^{15,25}$  eV were considered and zenith angles between 0 and 47 degrees. We found that the surface array is 100% efficient for the detection of the three types of primary particles considered with energies greater than the saturation energy  $E_{sat} = 10^{14,25}$  eV, regardless of its arrival direction, energy and shower core position over the array of detectors.

*Subject headings:* Molecular dynamics — Interatomic distances and angles — Polymers, elastomers, and plastics

#### 1. INTRODUCCIÓN

##### 1.1. *Los rayos cósmicos*

El estudio de la radiación cósmica tiene su origen en el siglo XX, un poco después de que Becquerel descubriera la radiactividad. En ese entonces los científicos que se encontraban estudiando la conductividad remanente del aire expuesto a fuentes radiactivas, atribuían el origen de dichas fuentes a los

elementos presentes en el suelo terrestre. Sin embargo, entre 1911 y 1912, el austriaco Victor Hess hizo una serie de viajes en globo (alcanzando una altura máxima de 5 km) y demostró que la ionización del aire aumentaba con la altura a partir de un cierto punto. Con esto concluyó que debería existir una fuente extraterrestre de radiación ionizante Grupen (2005).

Posteriormente, se descubrió que la ionización en

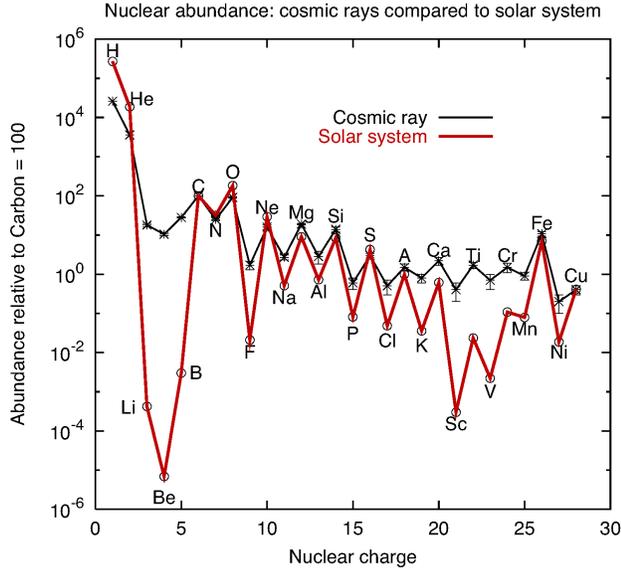


FIG. 1.— Abundancia nuclear de los rayos cósmicos galácticos (negro) comparada con la del sistema solar (rojo), relativa al carbono. Se observa una mayor abundancia de Li, Be, B y los elementos que se encuentran por debajo del hierro, debido a una fragmentación de los núcleos más pesados. La imagen fue obtenida de la referencia Université Libre de Bruxelles (2018).

la atmósfera se debía a radiación secundaria producida por radiación primaria aún más alto en la atmósfera, compuesta sobre todo por partículas cargadas, que fueron denominadas rayos cósmicos (RC) Blackett & Occhialini (1993). Los RC primarios son radiación cósmica que incluye partículas subatómicas y núcleos atómicos. Las trayectorias de las partículas cargadas son modificadas durante su propagación por el espacio intergaláctico, debido sobre todo a su interacción con los campos magnéticos presentes. Es interesante estudiarlos ya que sus mecanismos de producción y aceleración son diversos y no se han podido reproducir condiciones experimentales como esas en laboratorios terrestres Grupen (2005).

En la figura 1 se muestra la abundancia elemental de los RC galácticos comparada con la composición del sistema solar, relativa al carbono. Los protones son las partículas dominantes (89%), seguidas por las partículas  $\alpha$  (9%), electrones (1%), elementos livianos y pesados. Se puede observar que existen diferencias marcadas para elementos como el litio, berilio y boro ( $Z = 3 - 5$ ) y para los elementos que se encuentran debajo del grupo del hierro ( $Z < 26$ ). La mayor abundancia de Li, Be y B en los rayos cósmicos puede entenderse como una fragmentación del carbono y del oxígeno; y de la misma forma la fragmentación del hierro incrementa la población de los elementos que se encuentran debajo de él. Hasta el momento todos los elementos de la tabla periódica han sido encontrados en los RC Grupen (2005).

El flujo de los RC disminuye drásticamente a medida que su energía aumenta, como se observa en el espectro total reconstruido por diferentes experimentos en la figura 2 y se extiende en un rango de energía

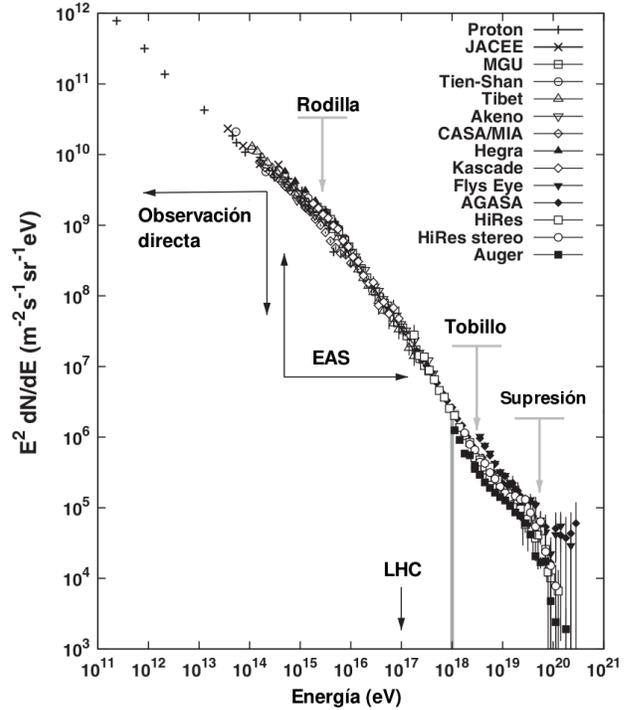


FIG. 2.— Espectro total de energía de los rayos cósmicos primarios medido por diferentes experimentos. El flujo fue multiplicado por  $E^2$  para resaltar las estructuras del espectro como la rodilla y el tobillo. La figura fue obtenida de la referencia Lettesier-Selvon & Stanev (2011).

de más de diez ordenes de magnitud Grieder (2001). Sigue una ley de potencias como se muestra en la ecuación 1, donde el valor de  $\alpha$  es aproximadamente 3:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}. \quad (1)$$

Se hace una división aproximada del espectro en tres regiones que clasifica a los RC según su origen dependiendo de su energía: solares ( $E < 10^{10}$  eV), galácticos ( $10^{10} < E < 10^{18}$  eV) y extragalácticos ( $10^{18} < E < 10^{21}$  eV). Sin embargo, los límites de energía continúan siendo un tema de estudio.

Estos límites de energía se deben a que los mecanismos que aceleran los RC son diferentes, por ejemplo el candidato para acelerador de los RC galácticos son los remanentes de supernova. En general, los objetos galácticos no tienen el tamaño ni los campos magnéticos para acelerar los RC más energéticos Grieder (2001).

También se observan dos estructuras que representan cambios en la pendiente, la rodilla en aproximadamente  $10^{15}$  eV y el tobillo alrededor de  $10^{18}$  eV. Por otro lado, existe una región de supresión del flujo debido al límite GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) en el que los RC con energías mayores a  $3 \cdot 10^{19}$  eV interactúan con la radiación cósmica de fondo y pierden energía, es por eso que se detectan muy pocos RC con energías superiores a este límite. A pesar de que los RC fueron descubiertos hace mucho tiempo, su origen continúa siendo un misterio Grieder (2001).

Cuando los RC primarios interactúan con los

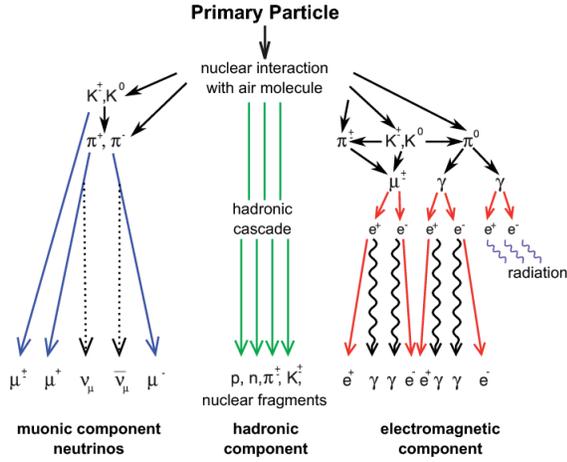


FIG. 3.— Componentes de una cascada de partículas secundarias generadas por un rayo cósmico primario, muónica, hadrónica, electromagnética y de neutrinos. La imagen fue obtenida de la referencia Haungs *et al.* (2015)

núcleos de la atmósfera producen cascadas extensas de partículas (EAS por su sigla en inglés). Estas partículas secundarias se mueven prácticamente en la misma dirección que el primario, pero durante el desarrollo de la cascada son dispersadas alrededor de su eje. La región central de la cascada conocida como núcleo, tiene un máximo de densidad de partículas y es más compacta que los bordes. La extensión lateral del chubasco es causada esencialmente por los momentos transversales transferidos en las interacciones hadrónicas y por la dispersión múltiple de partículas de baja energía Flugge (1961).

Haciendo una descripción simplificada de las EAS, se toma en cuenta que tienen cuatro componentes: electromagnética, muónica, hadrónica y de neutrinos, como se muestra en la figura 3. El núcleo está compuesto por hadrones energéticos que constantemente inyectan energía a las demás componentes mediante decaimientos e interacciones. La componente electromagnética es generada principalmente por el decaimiento de  $\pi^0$  en rayos gamma, que a su vez producen pares  $e^\pm$ ; en su desarrollo van alternando los procesos de producción de pares, bremsstrahlung y dispersión de Coulomb. Esta componente lleva aproximadamente el 90 % de la energía del chubasco. Las componentes de muones y de neutrinos se forman por el decaimiento de piones cargados y kaones. El número de partículas producidas crece a medida que aumenta la profundidad atmosférica, hasta que los procesos de absorción como la ionización, dispersión de Compton y efecto fotoeléctrico dominan y provocan que la cascada se extinga gradualmente después de alcanzar su máximo. Debido a la incerteza en la profundidad atmosférica de la primera interacción y a fluctuaciones en el desarrollo del chubasco, el número total de partículas generadas varía significativamente Grupen (2005).

El tipo de partícula primaria determina la evolución del chubasco respecto al contenido y la distribución de energía a medida que la cascada se desarrolla en la atmósfera. Las EAS producidas por rayos gamma producen sobre todo fotones muy en-

ergéticos,  $e^-$  y  $e^+$  y sus características se ilustran con el modelo de Heitler que asume la generación de nuevas partículas en intervalos definidos por una longitud de interacción  $\lambda$ . En cada nivel la energía de las partículas padre es distribuida igualmente. La cascada continúa desarrollándose hasta que la energía de las partículas alcanza un valor crítico, para los electrones es 84 MeV en el aire Matthews (2015). Por otro lado, la teoría del desarrollo lateral de las partículas electromagnéticas que fue desarrollada por Nishimura, Katamata y Greisen (NKG) hace una aproximación de la densidad de electrones a una distancia dada del eje del chubasco. La densidad de partículas decrece rápidamente a medida que aumenta la distancia al núcleo Kamata, & Nishimura (1958).

Por otro lado, las EAS generadas por hadrones involucran reacciones nucleares que dan origen a las cuatro componentes. Para estudiar el desarrollo de un chubasco producido por núcleos más pesados, se asume que la cascada producida por un núcleo primario de masa atómica  $A$  se desarrolla como lo harían  $A$  chubascos producidos por protones. Por lo general, los núcleos más pesados interactúan más alto en la atmósfera Matthews (2015).

Los RC con energías menores a  $10^{14}$  eV pueden ser detectados de manera directa por satélites y detectores enviados en globos, pero los que tienen energías mayores deben ser estudiados indirectamente con arreglos de detectores en tierra ya que el flujo es muy bajo Grieder (2001). Por ejemplo, para RC con energías de  $10^{11}$  eV, el flujo es de 1 partícula/ $m^2$  s, para los que tienen energías alrededor de  $10^{15.5}$  el flujo es de 1 partícula/ $m^2$  año y para los RC con energías de  $10^{20}$  el flujo es de 1 partícula/ $km^2$  siglo. Existen diferentes experimentos en el mundo que detectan las partículas secundarias para estudiar los RC primarios. Es el caso del experimento ALPACA que gracias a su amplio campo de visión y gran sensibilidad, pretende estudiar fuentes denominadas Pevatrons que aceleran los RC hasta energías del orden de PeV Asaba *et al.* (2017).

## 1.2. El experimento ALPACA

El experimento ALPACA (Andes Large-area Particle detector for Cosmic-ray physics and Astronomy) es un proyecto científico desarrollado por Bolivia y Japón, cuyo objetivo principal es la determinación del origen de los RC galácticos. Se construirá en el Cerro Estuquería a 4740 m s.n.m. cerca del monte Chacaltaya, Bolivia ( $16^\circ 23'$  S,  $68^\circ 08'$  O) Asaba *et al.* (2017).

El arreglo superficial (AS) ocupará un área de  $\sim 83000$   $m^2$  y estará compuesto por 401 detectores de centelleo plásticos separados uno del otro sobre una cuadrícula de 15 m de espaciamiento. El detector de muones (DM) subterráneo tipo Cherenkov ocupará un área de  $\sim 5400$   $m^2$  y estará compuesto por 8 piscinas. El objetivo del DM es discriminar el tipo de RC primario usando el número de muones que llegan al nivel de detección. El campo de visión del AS es de aproximadamente 2 estereorradianes, la resolución

angular esperada es de aproximadamente 1 grado a 5 TeV y 0,2 grados alrededor de 100 TeV. Para rayos gamma de 100 TeV, la resolución de energía está estimada en  $\sim 25\%$  y el poder de rechazo de hadrones es mayor a 99.9% para 100 TeV, de manera que se rechacen la mayor cantidad de eventos producidos por hadrones. En la figura 4 se muestra el AS y el DM del experimento ALPACA Asaba *et al.* (2017).

Los objetivos científicos del experimento son:

- Estudiar el origen de los RC galácticos observando rayos gamma muy energéticos (5 TeV - 1 PeV) producidos por interacciones cercanas a las fuentes de RC.
- Medida de la anisotropía de los RC en el hemisferio sur celeste.
- Estudio detallado del campo magnético de la corona solar.
- Medida del espectro de energía de los RC alrededor de la región de la rodilla (100 TeV - 100 PeV).

Actualmente el experimento se encuentra en una etapa de construcción del primer grupo de 100 detectores que se denominará ALPAQUITA. Posteriormente se acoplarán los demás detectores de superficie y las piscinas de muones.

En este trabajo se caracterizó la eficiencia de disparo del arreglo superficial de detectores de ALPACA empleando los datos generados con simulaciones de Monte Carlo, para tres partículas primarias (protones, núcleos de hierro y rayos gamma) en función de su energía, para ángulos cenitales entre 0 y 47 grados.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

La eficiencia de disparo (ED) del arreglo superficial muestra su capacidad de detección en un rango de energía. Por encima de una determinada energía ( $E_{sat}$ ) del RC primario, la eficiencia de detección será del 100% independientemente de su dirección de llegada, energía, tipo y posición de impacto sobre el AS. La determinación de  $E_{sat}$  es muy importante para el experimento ya que a partir de esa energía, el área geométrica coincide con el área efectiva del arreglo de detectores y los datos obtenidos por el arreglo superficial serán empleados para la reconstrucción de las cascadas atmosféricas Abraham *et al.* (2010).

Con el objetivo de caracterizar la ED del arreglo de superficie del experimento ALPACA y determinar  $E_{sat}$ , se realizaron simulaciones de cascadas atmosféricas extensas en el programa CORSIKA Heck *et al.* (1998), tomando en cuenta las condiciones que se detallan en la subsección 2.1.

### 2.1. Simulaciones en CORSIKA

CORSIKA (COsmic Ray SIMulation for KAskade) es un programa que simula la evolución y las propiedades de las EAS de partículas en la atmósfera

basado en el método de Monte Carlo. Fue desarrollado en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Alemania, para realizar las simulaciones del experimento KASCADE (KARlsruhe Shower Core and Array DETector). Actualmente es muy usado en el área de rayos cósmicos y se encuentra en constante actualización con los datos obtenidos en aceleradores de partículas. El programa consiste de cuatro partes, la primera parte simula los decaimientos de partículas inestables y hace un seguimiento de las partículas tomando en cuenta las pérdidas de energía por ionización y la deflexión por dispersión múltiple en el campo magnético terrestre. La segunda parte trata las interacciones de núcleos y hadrones con los núcleos del aire a altas energías, la tercera parte simula las interacciones hadrónicas a bajas energías; la cuarta parte describe el transporte e interacción de  $e^-$ ,  $e^+$  y fotones energéticos Heck & Pierog (2017).

Las interacciones hadrónicas son simuladas por diferentes modelos, dependiendo de la energía. Si la energía es lo suficientemente alta, se emplean los modelos de interacciones hadrónicas DPMJET, EPOS, HDPM, QGSJET y QGSJET-II, SIBYLL y VENUS. Si la interacción corresponde a bajas energías, puede ser tratado con los modelos de interacciones hadrónicas FLUKA, GHEISHA y URQMD. Cada modelo viene acompañado de sus secciones eficaces y toma en cuenta una atmósfera compuesta por  $N_2$ ,  $O_2$  y  $Ar$  Heck & Pierog (2017).

En este trabajo se usó la versión 75700 de CORSIKA, el modelo de interacciones hadrónicas de alta energía QGSJET-II Ostapchenko (2013) (Quark Gluon String model with JETS). Hay mucha experiencia en la validación de este modelo y es bastante utilizado en diferentes experimentos. Las secciones eficaces que emplea para las interacciones se ajustan bien a datos experimentales en el rango de energía que se trabajará y no precisa de un tiempo de cómputo muy elevado Knapp *et al.* (2011). Para las interacciones hadrónicas de bajas energías se utilizó el modelo GHEISHA Fesefeldt (1985) que también se ajusta bien a datos experimentales.

Se realizaron las simulaciones en la súpercomputadora Cuetlaxcoapan del Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México, tomando en cuenta el nivel de observación de ALPACA. Se tomaron en cuenta tres partículas primarias: protones, núcleos de hierro y rayos gamma, con ángulos cenitales  $0^\circ < \theta < 47^\circ$ , en un rango de energía de  $10^{12,00} - 10^{15,25}$  eV en pasos de 0,25 en  $\log(E)$  con una muestra de 600 chubascos atmosféricos para cada paso de energía. El tamaño de la muestra fue calculado tomando en cuenta la aproximación de Wald para intervalos de confianza de una distribución binomial, como se muestra en la ecuación 2, para garantizar una precisión de por lo menos 0,1:

$$n = \frac{4\hat{p}(1-\hat{p})Z_{1-\alpha/2}^2}{a^2}, \quad (2)$$

donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $\hat{p}$  es el estimador de ED,  $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$  es el valor de la variable es-

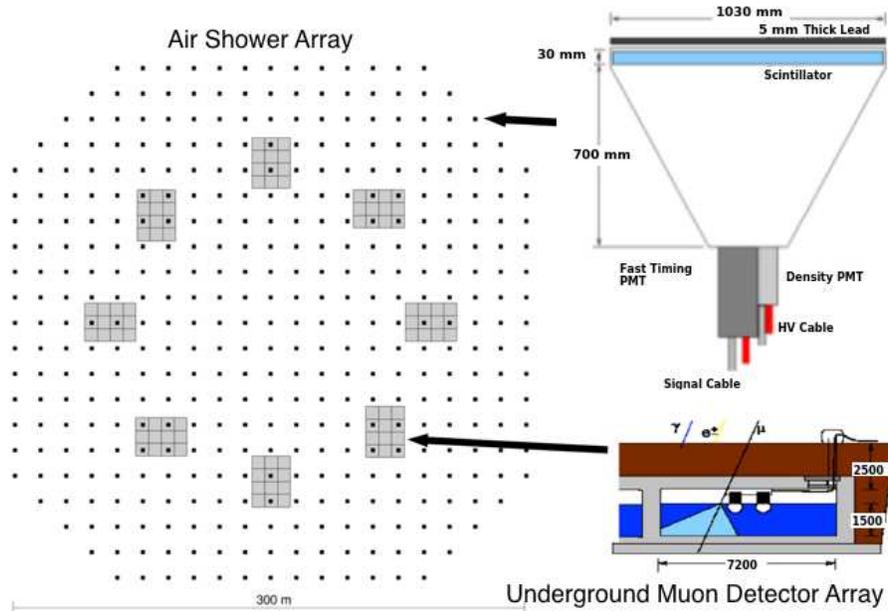
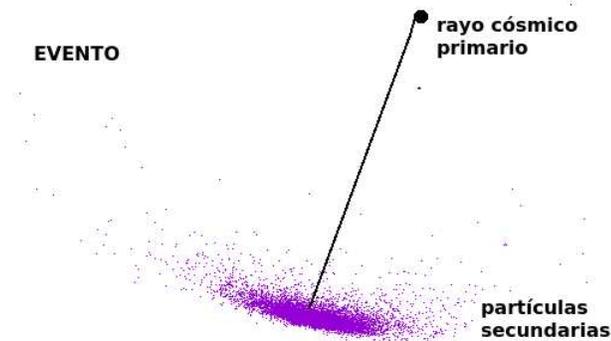


FIG. 4.— Vista esquemática del experimento ALPACA. Los cuadrados negros pequeños representan los 401 detectores de centelleo plásticos de  $1 \text{ m}^2$  separados por 15 m, que conforman el arreglo superficial. El arreglo superficial ocupará un área aproximada de  $83000 \text{ m}^2$ . Los rectángulos plomos muestran las 8 piscinas subterráneas que servirán como detectores de muones, cada una contiene 12 unidades de detectores de muones de  $56 \text{ m}^2$ . El área total del arreglo de detectores subterráneos será de  $5400 \text{ m}^2$ . En la figura superior derecha se muestra el detector de centelleo más detalladamente, y en la inferior derecha el detector de muones. La figura fue obtenida de la referencia ALPACA (2018).



#### detectores

FIG. 5.— Definición de evento, es un rayo cósmico primario que al interactuar con la atmósfera genera una cascada de partículas secundarias que llegan a los detectores.

tandarizada de la distribución normal para el cuantil  $1 - \alpha/2$  para un 95 % de confianza y  $a = 0,1$  es el ancho del intervalo de confianza o precisión. El archivo de entrada (input) utilizado para realizar las simulaciones se encuentra detallado en los anexos.

El resultado de las simulaciones que se utilizó para este trabajo son las partículas secundarias generadas por los RC primarios que llegan al nivel de detección. Cada RC primario que produce una cascada de partículas secundarias es considerado como un evento, como se muestra en la figura 5.

En la figura 6 se muestra un histograma en dos dimensiones del número de partículas secundarias que

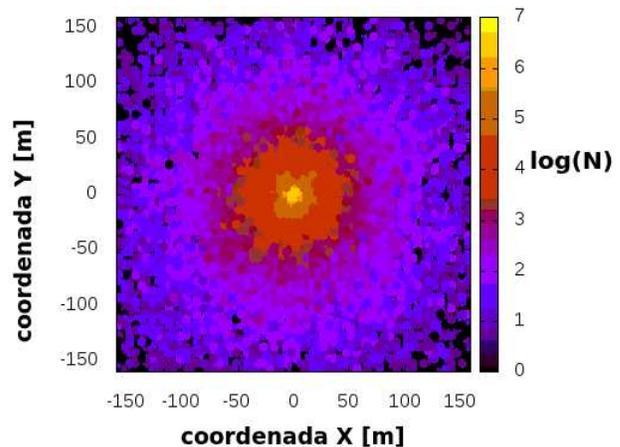


FIG. 6.— Histograma en dos dimensiones que muestra la densidad de partículas ( $N$ ) respecto a su distancia al núcleo del chubasco, para un protón de  $10^{14} \text{ eV}$ .

llegaron al nivel de detección, en función a su distancia al centro del chubasco. La partícula primaria fue un protón de  $10^{14} \text{ eV}$  y se puede observar que existe una mayor cantidad de partículas en el centro del chubasco que en los extremos.

#### 2.2. Caracterización de la eficiencia de disparo del AS de ALPACA

Con las partículas secundarias obtenidas de cada evento se seleccionaron aquellas que cayeron en los detectores del AS de ALPACA, que se muestra en la figura 4, tomando en cuenta una distancia de separación entre los detectores de 15 m, su tamaño ( $1 \text{ m}^2$ ) y su ubicación en el plano de detección.

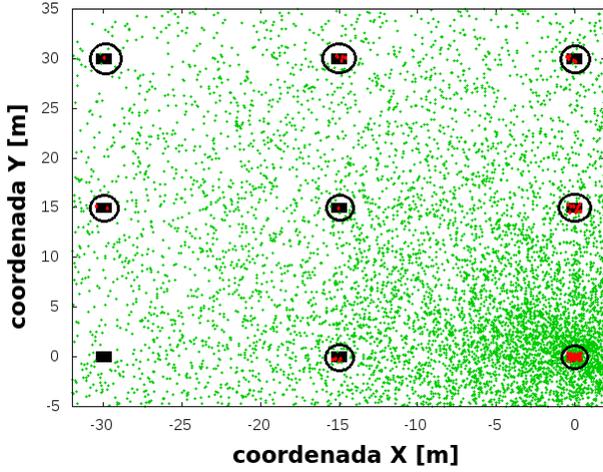


FIG. 7.— Condición de disparo, para determinar si un evento es detectado por el arreglo de superficie de ALPACA. Un detector activado (central) debe encontrarse rodeado por lo menos por otros 4 detectores activados. En rojo se muestran las partículas detectadas y en verde las no detectadas.

Para determinar si un evento es detectado, se impuso la siguiente condición de disparo: un detector activado debe encontrarse rodeado al menos por otros 4 detectores activados. En la figura 7 se ilustra esta situación, en verde se encuentran las partículas no detectadas y en rojo las partículas que caen en los detectores del arreglo. Para el detector activado que se encuentra en el centro de la figura, deben existir por lo menos 4 detectores activados alrededor de él. Esta condición permite tomar en cuenta los eventos que sean compactos dentro de la geometría del experimento y rechazar partículas que llegan casualmente a los detectores.

Por defecto, el centro de un EAS generado por CORSIKA se encuentra en el origen de coordenadas, como se muestra en la figura 6. Es por esto que se generaron nuevas posiciones para el centro de cada EAS, distribuidas uniformemente dentro de la región de confianza mostrada en la figura 8. Esta región considera una fila menos de detectores en cada arista del octógono que forma todo el AS. Fue definida de tal forma que no se tomen en cuenta los eventos que caen en los bordes del AS. De esta forma, los resultados obtenidos para la eficiencia de disparo serán independientes de la posición del centro del chubasco sobre el AS de ALPACA.

La eficiencia de disparo del AS fue calculada como el número de eventos detectados entre el número total de eventos simulados, para cada tipo de partícula primaria en el intervalo de energías mencionado anteriormente:

$$ED = \frac{\text{\#eventos detectados}}{\text{\#eventos simulados}} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Distribución de los ángulos cenitales para RC primarios generados por CORSIKA

Los ángulos cenitales de los RC primarios generados por CORSIKA se relacionan con la intensidad

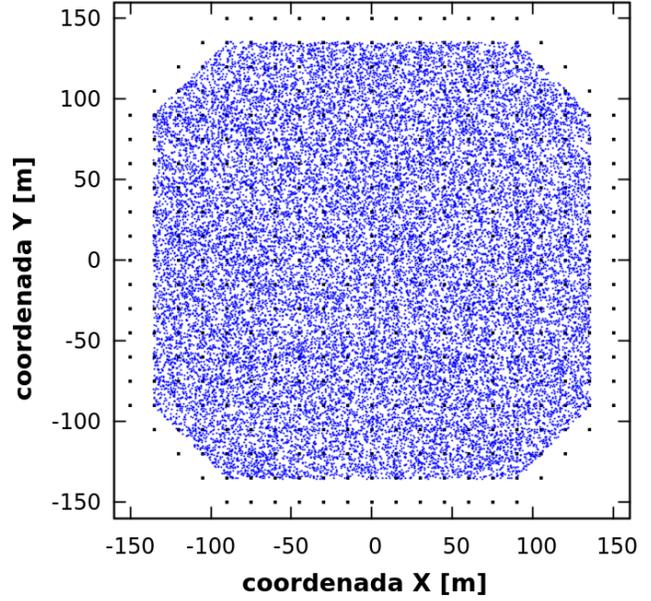


FIG. 8.— Región de confianza definida sobre el AS de ALPACA que considera una fila menos de detectores en cada arista. Los puntos azules representan las nuevas posiciones del núcleo de cada EAS, que se encuentran distribuidas uniformemente sobre la región de confianza.

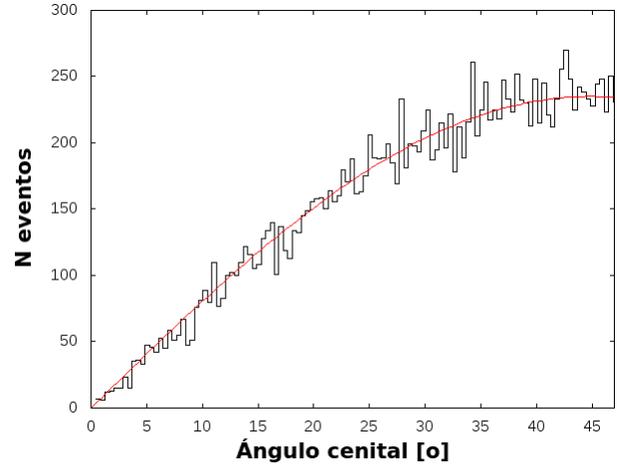


FIG. 9.— Distribución de los ángulos cenitales generados por CORSIKA, que toma en cuenta un flujo constante para cada elemento de ángulo sólido del cielo. En rojo se muestra la función de distribución con la que se relaciona  $f(\theta) \propto \text{sen}(\theta)\cos(\theta)$ .

primaria como  $I \propto \text{sen}\theta \cos\theta$ . El término  $\text{sen}\theta$  toma en cuenta el elemento de ángulo sólido del cielo y  $\cos\theta$  respeta la geometría de un detector plano. En la figura 9 se muestra la distribución de  $\theta$  de todos los eventos simulados.

#### 3.2. Número y tipo de partículas generadas por las EAS en función de la energía del RC primario

Dependiendo del RC primario, las partículas generadas que llegan al nivel de detección son diferentes, tanto en cantidad como en tipo de partícula. En la figura 10 se muestra el número total de partículas promedio que llegan al nivel de detección,

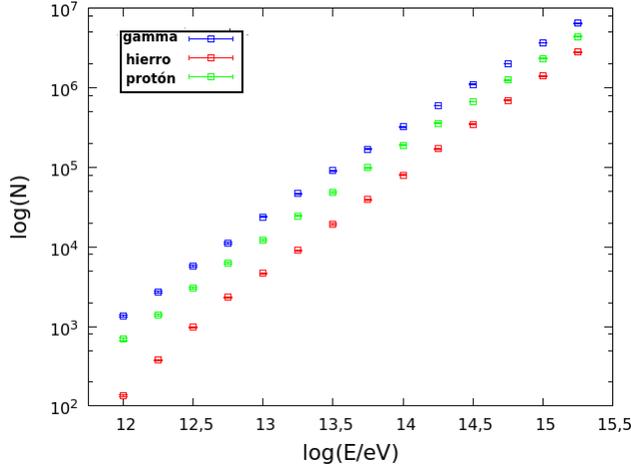


FIG. 10.— Número total promedio de partículas secundarias ( $N$ ) que llegan al nivel de detección en función de la energía de la partícula primaria. En azul se muestra el resultado para rayos gamma primarios, verde para protones y rojo para núcleos de hierro.

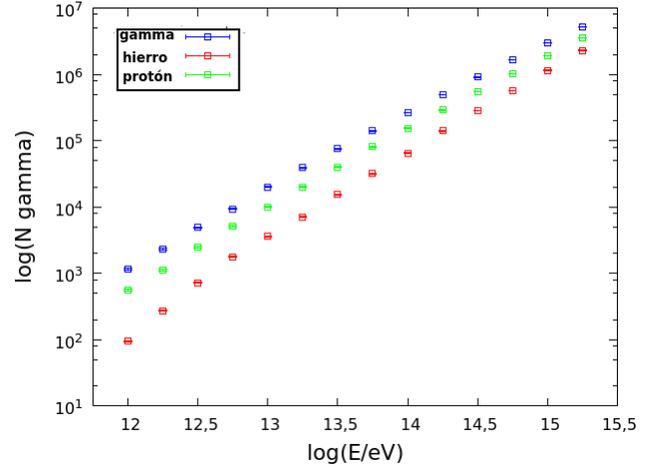


FIG. 12.— Número promedio de rayos gamma secundarios que llegan al nivel de detección en función de la energía de la partícula primaria. En azul se muestra el resultado para rayos gamma primarios, verde para protones y rojo para núcleos de hierro.

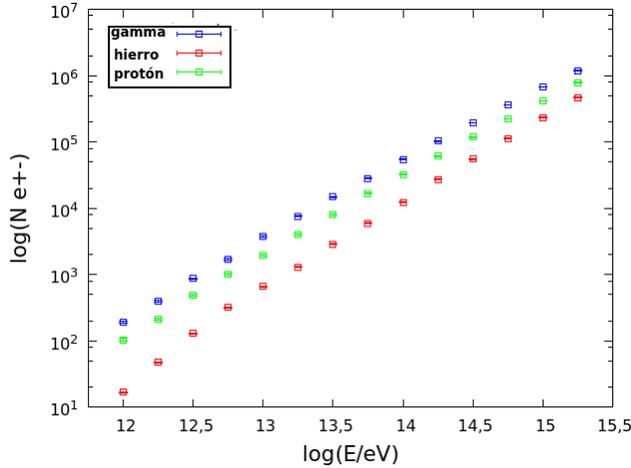


FIG. 11.— Número promedio de  $e^\pm$  secundarios que llegan al nivel de detección en función de la energía de la partícula primaria. En azul se muestra el resultado para rayos gamma primarios, verde para protones y rojo para núcleos de hierro.

para las tres partículas primarias en función de su energía. A medida que la energía del primario aumenta, también lo hace la cantidad de partículas secundarias. Para una misma energía, se observó que llegan muchas más partículas secundarias de rayos gamma primarios, que de protones o núcleos de hierro.

Por otro lado, se calculó el número promedio de  $e^\pm$  como se muestra en la figura 11, rayos gamma (Figura 12) y  $\mu^\pm$  (Figura 13), para las tres partículas primarias, en función de su energía. En las figuras 11 y 12 el número de partículas secundarias de la componente electromagnética es mayor para los rayos gamma (azul) como primarios, comparados con los producidos en un EAS de protón (verde) o de núcleos de hierro (rojo).

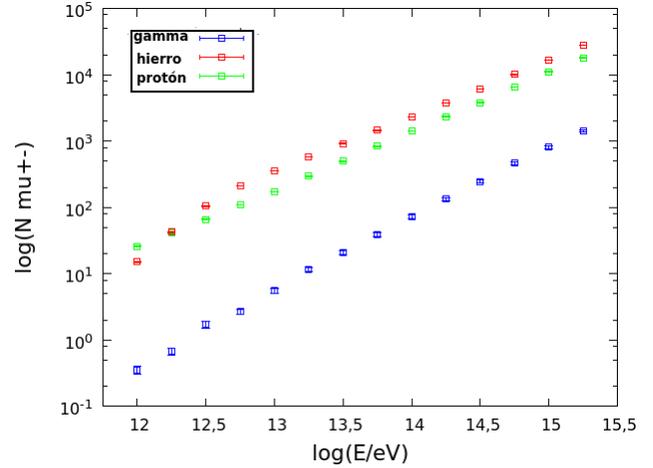


FIG. 13.— Número promedio de  $\mu^\pm$  secundarios que llegan al nivel de detección en función de la energía de la partícula primaria. En azul se muestra el resultado para rayos gamma primarios, verde para protones y rojo para núcleos de hierro. Nótese que son muchos menos que los rayos gamma y  $e^\pm$ .

### 3.3. Eficiencia de disparo del AS de ALPACA y energía de saturación

En la figura 14 se muestra la eficiencia de disparo del AS de ALPACA en función de la energía de la partícula primaria, los puntos en rojo corresponden a núcleos de hierro, los verdes a protones y los azules a rayos gamma. Para una misma energía, el AS de ALPACA es más eficiente en la detección de rayos gamma que de los otros primarios. Esto se debe principalmente a que los rayos gamma producen una mayor cantidad de partículas secundarias que permiten que los eventos cumplan con la condición de disparo y sean detectados. También se calculó que la eficiencia de disparo es  $> 95\%$  para energías mayores a  $10^{14}$  eV y que la energía de saturación es  $E_{sat} = 10^{14,25}$  eV donde el AS del experimento es prácticamente  $100\%$  eficiente en la detección de estos tres tipos de primarios, independiente de su di-

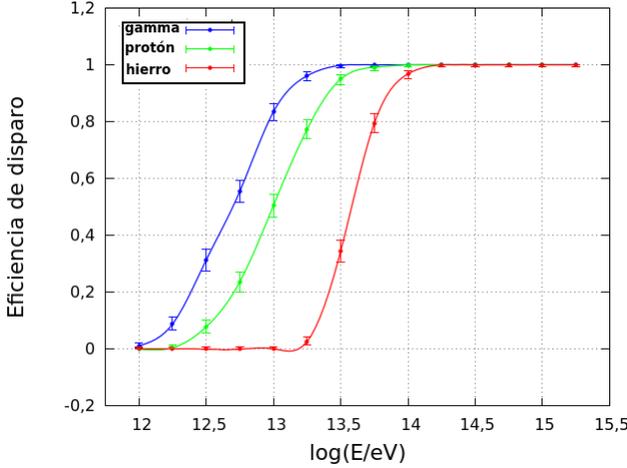


FIG. 14.— Eficiencia de disparo del arreglo de superficie de ALPACA en función de la energía del rayo cósmico primario: protones (verde), rayos gamma (azul) y núcleos de hierro (rojo). Las líneas fueron puestas solamente para guiar al lector.

recepción de llegada, energía y punto de impacto sobre el arreglo de detectores.

Los datos siguen una distribución binomial ya que sólo existen dos posibles resultados para los eventos, que sea detectado o no. De esta forma, los errores de los estimadores de la eficiencia de disparo fueron calculados con intervalos de confianza del 95%. Para valores de ED cercanos a 0,5 se empleó la aproximación de Wald, donde el intervalo de confianza está dado por:

$$IC = \left[ \hat{p} - Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}}, \hat{p} + Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}} \right], \quad (4)$$

donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $\hat{p}$  es el estimador de ED,  $\hat{q} = 1 - \hat{p}$  y  $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$  es el valor de la variable estandarizada de la distribución normal para el cuantil  $1 - \alpha/2$  para un 95% de confianza. Para el caso de probabilidades en los extremos se empleó la aproximación de Wilson score Newcombe (1998), tanto para el límite inferior (LI) si  $\hat{p} = 1$  y para el superior (LS) si  $\hat{p} = 0$ , como se muestra a continuación:

$$LI = \frac{(2n\hat{p} + Z_{1-\alpha/2}^2 - 1) -}{2(n + Z_{1-\alpha/2}^2)} \quad (5)$$

$$\frac{Z_{1-\alpha/2} \sqrt{Z_{1-\alpha/2}^2 - 2 - 1/n + 4\hat{p}[n\hat{q} + 1]}}{2(n + Z_{1-\alpha/2}^2)} \quad (6)$$

$$LS = \frac{(2n\hat{p} + Z_{1-\alpha/2}^2 + 1) +}{2(n + Z_{1-\alpha/2}^2)} \quad (7)$$

$$\frac{Z_{1-\alpha/2} \sqrt{Z_{1-\alpha/2}^2 + 2 + 1/n + 4\hat{p}[n\hat{q} - 1]}}{2(n + Z_{1-\alpha/2}^2)}. \quad (8)$$

Para valores de  $0 < \hat{p} \leq 0,2$  y  $0,85 \leq \hat{p} < 1$ , los intervalos de confianza se calcularon con el método exacto de Clopper-Pearson, asociado a la distribución Beta Newcombe (1998):

$$IC = [B(\alpha/2; x, n-x+1), B(1-\alpha/2; x+1, n-x)], \quad (9)$$

donde  $x$  es el número de éxitos,  $n$  el tamaño de la muestra y  $B$  la función cuantil-Beta.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran las características de tres tipos de partículas primarias, rayos gamma, protones y núcleos de hierro al nivel de detección del experimento ALPACA y se realizó un estudio analítico de la eficiencia de disparo utilizando las partículas secundarias generadas con simulaciones de Monte Carlo.

La caracterización de la eficiencia de disparo del arreglo de superficie del experimento ALPACA es muy importante, ya que muestra su capacidad de detección para las tres partículas primarias usadas en un rango de energías de  $10^{12.00} - 10^{15.25}$  eV, con ángulos cenitales entre 0 y 47 grados.

La ED calculada en este rango de energía se encuentra directamente relacionada con la geometría del experimento (tamaño y distribución de los detectores) y con la condición de disparo establecida. Esta condición garantizará que los chubascos detectados sean compactos en la región que cubre el AS y que no se tomen en cuenta partículas que llegan a los detectores casualmente. Con la región de confianza establecida en la figura 8 se descartan aquellos eventos cuyos núcleos se encuentran en los bordes del arreglo.

Como se mostró en la figura 14, la ED aumenta a medida que la energía de la partícula primaria es mayor. Para una misma energía de la partícula primaria, la eficiencia de disparo es mayor para los rayos gamma que para protones y núcleos de hierro, esto debido principalmente a que al nivel de observación del experimento (4740 m s.n.m), las EAS iniciadas por rayos gamma primarios generan mayor cantidad de partículas secundarias que las iniciadas por los otros dos primarios estudiados, como se mostró en la figura 10. En consecuencia, existe un mayor número de eventos que cumplen con la condición de disparo. Las figuras 11 y 12 muestran que las partículas correspondientes a la componente electromagnética (rayos gamma,  $e^+$  y  $e^-$ ) son mayores en EAS generadas por rayos gamma primarios que para protones y núcleos de hierro, debido a las interacciones que se dan durante el desarrollo de estas EAS en la atmósfera. Por otro lado, en la figura 13 se observó que la cantidad de muones presentes en las EAS iniciadas por rayos gamma es mucho menor que aquellas iniciadas por protones y núcleos de hierro. Esta diferencia se debe a que generalmente los rayos gamma producen EAS más profundas y pobres en muones, que los núcleos y hadrones que las generan más alto en la atmósfera. Precisamente este criterio es el que se utilizará para determinar el tipo de partícula primaria, a partir de los datos obtenidos en el experimento.

Se determinó que el AS de ALPACA tiene una eficiencia mayor al 95% para partículas primarias con

energías mayores a  $10^{14}$  eV y que se alcanza una eficiencia del 100% a partir de la energía de saturación que corresponde a  $E_{sat}=10^{14,25}$  eV. Esto muestra que el AS es completamente eficiente en la detección de partículas primarias con energías mayores a  $E_{sat}$ , independientemente de su dirección de llegada, energía y posición del centro del chubasco sobre el plano de detección.

La determinación de la eficiencia de disparo y de criterios de selección de eventos son muy importantes para el experimento, ya que permitirán realizar una mejor reconstrucción de los eventos registrados. El tamaño de la muestra es importante para los cálculos realizados, ya que con muestras pequeñas, se observan fluctuaciones muy grandes en los resultados. Se espera continuar con este trabajo e incluir otras variables como las diferencias de tiempos de llegada de las partículas secundarias y la respuesta de un detector individual basados en la señal que se genera.

En el futuro se espera comparar los resultados obtenidos en este trabajo con aquellos que serán obtenidos por los detectores una vez que sean instalados y puestos en funcionamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes del laboratorio de rayos cósmicos de la Universidad Mayor de San Andrés: Dr. Martin Subieta, Dr. Hugo Rivera, Ing. Pedro Miranda, Msc. Mirko Rajjevic, Dr. Rolando Ticona, Lic. Carlos Nina y estudiantes por apoyarme durante el desarrollo de este trabajo. A la Dra. Karen Salomé Caballero Mora de la Universidad Autónoma de Chiapas y al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México por permitirme realizar las simulaciones y el análisis de los datos en la supercomputadora Cuetlaxcoapan.

## APÉNDICE

### A. ARCHIVO DE ENTRADA PARA SIMULACIONES EN CORSIKA

En el siguiente cuadro se muestra el input utilizado para realizar las simulaciones de chubascos atmosféricos en CORSIKA. RUNNR es el número de la corrida de la simulación, EVTNR indica el número del primer evento de la corrida, NSHOW muestra el número de EAS generadas en cada simulación.

Los parámetros en los que se puso información del RC primario son PRMPAR que indica el tipo de RC primario utilizado, ESLOPE es la potencia del espectro de RC, ERANGE es el rango de energías de la partícula primaria (en GeV), THETAP es el ángulo cenital del primario y PHIP es el ángulo azimutal del primario.

Los parámetros para los modelos hadrónicos empleados fueron QGSJET indica el modelo de interacción de alta energía, QGSSIG toma en cuenta las secciones eficaces del modelo de interacción QGSJET, HILOW muestra el límite de energía entre el modelo

de interacción hadrónica de alta energía y el de baja energía y SEED son las semillas de números aleatorios empleados en la simulación.

Por otro lado, los parámetros con información sobre el lugar de observación fueron OBSLEV que es el nivel de observación de los detectores (en cm), FIXHEI indica la altura de la primera interacción (en este caso será aleatoria), MAGNET muestra la componente X y Z del campo magnético terrestre para la locación del experimento (en  $\mu$ T), ATMOSPHERE muestra el modelo de atmósfera empleado y TSTART indica que el tiempo registrado para la partícula es a partir de la primera interacción.

También se encuentran los parámetros que permitieron limitar la información de salida de la simulación, ECUTS son las energías cinéticas mínimas (en GeV) que deben tener los hadrones, muones, electrones y fotones para ser registrados, MUADDI proporciona información adicional de los muones, MUMULT toma en cuenta la dispersión múltiple de muones según la teoría de Molière, ELMFLG activa el tratamiento de la componente electromagnética del chubasco, STEPFC permite definir pasos más grandes al registrar las partículas secundarias cuando las simulaciones son muy largas, RADNKG define el radio (en cm) en el tratamiento NKG, LONGI activa el seguimiento del desarrollo longitudinal del chubasco, ECTMAP define un corte en el factor de Lorentz para registrar las partículas secundarias, MAXPRT indica el máximo número de eventos que se registran detalladamente, DIRECT muestra el directorio en el que se guardan los resultados y USER indica el usuario en la computadora.

RUNNR		1		
EVTNR		1		
NSHOW		5		
PRMPAR		1		
ESLOPE		-2.7		
ERANGE		1E3	1E3	
THETAP		0.	47.	
PHIP		-180.	180.	
QGSJET		T	0	
QGSSIG		T		
HILOW		80		
SEED1		2331	0	0
SEED2		2332	0	0
OBSLEV		4740.E2		
FIXHEI		0.	0	
MAGNET		22.595	-4.379	
ATMOSPHERE		3	F	
TSTART		F		
ECUTS	0.3	0.3	0.003	0.003
MUADDI		F		
MUMULT		T		
ELMFLG		T	T	
STEPFC		1.0		
RADNKG		200.E2		
LONGI	F	10.	F	F
ECTMAP		1.E4		
MAXPRT		1		
DIRECT	/scratch	/201801092c	/corsikaout/	
USER		carla		
DEBUG	F	6	F	100000
EXIT				

## REFERENCIAS

- Grupen, C. 2005. *Astroparticle Physics* (Berlin: Springer)
- Blackett, P.M.S., & Occhialini G.P.S. 1933, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **139**, 699
- Université Libre de Bruxelles, 2018, PHYS-467, disponible en <<http://w3.ihe.ac.be/aguilar/PHYS-467/PA3.html>> [Consulta: 16 de mayo de 2018]
- Grieder, P. 2001. *Cosmic Rays at Earth* (Berna: Instituto de Física de la Universidad de Berna)
- Lettesier-Selvon, A., & Stanev, T. 2011, *Reviews of Modern Physics*, **83**, 907
- Flugge, S. 1961, *Cosmic Rays I* (Heidelberg: Springer)
- Haungs, A., Blumer, J., Fuchs, B., Kang, D., Schoo, S., Wochele, D., Wochele, J., Apel, W D., Arteaga-Velázquez, J.C., Bekk, K., Bertaina, M., Bozdog, H., Brancus, I.M., Cantoni, E., Chiavassa, A., Cossavella, F., Daumiller, K., de Souza, V., Di Piero, F., Doll, P., Engel, R., Fuhrmann, D., Gherghel-Lascu, A., Gils, H.J., Glasstetter, R., Grupen, C., Heck, D., Hörandel, J.R., Huber, D., Huege, T., Kampert, K.H., Klages, H.O., Link, K., Luczak, P., Mathes, H.J., Mayer, H.J., Milke, J., Mitrica, B., Morello, C. Oehlschläger, J., Ostapchenko, S., Palmieri, N., Petcu, M., Pierog, T., Rebel, H., Roth, M., Schieler, H., Schröder, F.G., Sima, O., Toma, G., Trinchero, G.C., Ulrich, H., Weindl, A., & Zabierowski, J. 2015, *Journal of Physics: Conference Series*, **632**, 012011
- Matthews, J. 2005. *Astroparticle Physics*, **22**, 387
- Kamata, K., & Nishimura, J. 1958. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, **6**, 93
- Asaba, T. et al. 2017. “The overview of the ALPACA Experiment” en *35th International Cosmic Ray Conference ICRC2017. Japón*. Disponible en <<http://www.icrc2017.org/>> [Consulta: 23 de Marzo de 2017].
- ALPACA Experiment. Air Shower Array. 2018 <<http://www.alpaca-experiment.org/>> [Consulta: 13 de mayo de 2018]
- Abraham, J. et al. (2010). *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A* **613**, 29
- Heck, D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., & Thouw T. 1998, “CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers”. Report FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe. Disponible en <<http://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php>> [Consulta: 14 de mayo de 2018]
- Heck D., & Pierog T. 2017. “Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A Users Guide (Version 7.5700 from June 2, 2017)”. KIT - Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft
- Ostapchenko, S. 2013, “QGSJET-II: physics, recent improvements, and results for air showers” en *EPJ Web of Conferences*, vol 52. Disponible en <[https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2013/13/epjconf\\_isvh2012\\_02001/epjconf\\_isvh2012\\_02001.html](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2013/13/epjconf_isvh2012_02001/epjconf_isvh2012_02001.html)> [Consulta: 16 de Marzo de 2018]
- Knapp J., Heck D. & Schatz G. 1996, “Comparison of Hadronic Interaction Models Used in Air Shower Simulations and of Their Influence on Shower Development and Observables”. Report FZKA 5828. Forschungszentrum Karlsruhe. Disponible en <<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0103073.pdf>> [Consulta: 20 de Marzo de 2018]
- Fesefeldt, H. 1985, Report PITHA 85/02, RWTH Aachen. Disponible en <<http://cds.cern.ch/record/162911/files/CM-P00055931.pdf>> [Consulta: 13 de mayo de 2018]
- Newcombe, R. 1998, *Statistics in Medicine*, **17**, 857