

# Inclusión de la Universidad de Nariño en la Colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory) a través del Diseño, Construcción, e Instalación de un Tanque - Detector Cherenkov

Inclusion of the University of Nariño in the LAGO Collaboration (Latin American Giant Observatory) through the Design, Construction, and Installation of a Water Cherenkov Detector

Karla Reyes, James Perengüez, Alberto Quijano

Departamento de Física  
Universidad de Nariño

---

## Resumen

En el siguiente trabajo de investigación denominado *Inclusión de la Universidad de Nariño en la Colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory)*, a través del diseño, construcción e instalación de un tanque - detector Cherenkov, se muestran los principales avances llevados a cabo hasta el momento, entre los cuales cabe resaltar la inclusión de la Universidad de Nariño a la mencionada Colaboración Internacional a través de la firma de un Acuerdo de Entendimiento firmado por las partes: Representante LAGO a nivel Internacional, representante LAGO Colombia y representante LAGO Pasto fortaleciendo las relaciones académicas con los distintos grupos de trabajo de la Colaboración LAGO en Colombia y Latino América. Igualmente se determinó el flujo de partículas a nivel del suelo en San Juan de Pasto, se determinaron los diseños para la instalación del tanque - detector Cherenkov, se adquirieron los componentes para la instalación del tanque y se implementó la electrónica que hace posible la adquisición de datos utilizando una nueva electrónica con el uso de la tarjeta RED-Pitaya. El experimento servirá como un laboratorio de aprendizaje en el análisis de datos para los estudiantes de física e ingenierías. Ser parte de LAGO es de suma importancia ya que promoverá la realización de varias investigaciones así como también la movilidad académica.

**Palabras Claves:** LAGO, Cherenkov, astropartículas, rayos cósmicos.

## Abstract

In this research work entitled *Inclusion of the University of Nariño in the LAGO (Latin American Giant Observatory) Collaboration, through the design, construction and installation of a water Cherenkov detector*, the main advances carried out are here presented. We want to highlight the inclusion of the University of Nariño in the LAGO Collaboration through the signing of an Agreement of Understanding signed by all the staff involved. It was also possible to determine the flow of particles at ground level in San Juan de Pasto, as well as to strengthen academic relations with the different LAGO Collaboration work groups in Colombia and Latin America. During the project execution time, the designs for the installation of a water Cherenkov detector were determined, the components for the installation of the tank were acquired and the electronics that made the acquisition of data possible were implemented, respect to this last aspect, we used the new LAGO electronics relating to the use of the RED-Pitaya electronic card. The experiment, once fully installed, will also serve as a learning laboratory in data analysis for students of physics and engineering.

**Keywords:** LAGO, Cherenkov, astroparticles, cosmic rays.

## 1. Introducción

El proyecto LAGO es una experiencia de colaboración emergente, surgida de la asociación de investigadores latinoamericanos a partir de la experiencia del Observatorio Pierre Auger y que proponen distribuir detectores Cherenkov en agua (WCD, por sus siglas en inglés Water Cherenkov Detector) en 8 países de América Latina (Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú y Venezuela). Si bien originalmente la red se planteó para la detección de la componente de alta energía de los destellos de rayos gamma, recientes estudios muestran que la red tiene capacidad para el estudio de la modulación solar de rayos cósmicos, además de otros temas de investigación. A través de esta propuesta se logró diversificar la línea de investigación en astrofísica de la Universidad de Nariño, involucrando a la misma al conjunto de Universidades Colombianas y por lo tanto de América Latina que desarrollan este tipo de proyectos. LAGO dispone de todas las características para desarrollar un espacio de apropiación tecnológica, una comunidad virtual multidisciplinaria, geográficamente distribuida, que coopera en torno a un proyecto científico en América Latina, utilizando infraestructura de redes informáticas avanzadas como CLARA y RENATA [1], [2].

Un detector Cherenkov típico del proyecto LAGO, consta principalmente de un tanque con agua (como los de uso comercial para el almacenamiento de agua), un tubo Fotomultiplicador (PMT), la electrónica especializada y el sistema de adquisición de datos, entre otras cosas. Aunque se trata de un hecho perfectamente comprobado, seguramente muchas personas se sorprenderán al saber que la superficie de la Tierra se encuentra sometida a un bombardeo constante de partículas relativistas las cuales pueden dividirse en dos categorías: Los rayos cósmicos primarios, que son aquellas partículas que son aceleradas en las estrellas, y los rayos cósmicos secundarios, que tienen origen en la interacción de los primeros con el gas interestelar [3], [4].

Se definen las astropartículas, rayos cósmicos o primarios, a las partículas que se originan fuera del sistema solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano siendo en su mayoría núcleos atómicos, se excluyen de esta categoría a los fotones. Los rayos cósmicos de ultra alta energía, corresponden a energías mayores a  $10^{18}$  eV. Los destellos de rayos gamma o gamma ray burst (GRB) son explosiones súbitas de fotones de alta energía, en realidad son los fenómenos más energéticos y luminosos en el universo. Fueron descubiertos en la década de los 60 por satélites militares estadounidenses encargados de rastrear actividad de ensayos de dispositivos nucleares. Estas ráfagas aparecen como haces de fotones de alta energía ( $> 1$  KeV) que ocurren pocas veces al día y en periodos muy cortos de tiempo (0.1 - 100 s) [5].

El modelo más aceptado para explicarlos tiene su origen en la hipótesis de que son originados en explosiones estelares. Hasta el día de hoy, el mayor aporte al conocimiento de los GRB ha provenido de las observaciones de telescopios satélites tales como HETE, INTEGRAL, Swift y GLAST. Al aumentar la energía de los fotones su flujo sigue una ley de potencias de tal manera que se hace difícil determinar en el espacio dichas energías (debido a que se necesitarían grandes áreas y esto es supremamente costoso), por lo anterior el espectro en energía de esos destellos se conoce bien a bajas energías, pero se tiene muy poca información sobre las regiones de alta energía, por arriba de 1 GeV. Para aumentar el área de registro se ha comenzado a instalar detecciones en tierra. Estos observatorios complementan y refrendan la información obtenida por los satélites [6], [7].

Los rayos cósmicos de las más altas energías conocidas provienen del exterior de la galaxia. Sus lugares de origen han sido identificados en regiones relativamente cercanas del universo, en las que hay galaxias con agujeros negros supermasivos y muy activos en su centro. Estos agujeros negros inducen fenómenos especialmente violentos, que podrían acelerar partículas a energías cientos de millones de veces superiores a las máximas alcanzables con los aceleradores más potentes construidos en laboratorios terrestres. Desde hace más de cuatro décadas se supone que los rayos cósmicos que arriban a la Tierra con muy altas energías no pueden provenir de galaxias demasiado lejanas, pues en un recorrido muy extenso los frenarían los choques con el fondo cósmico de microondas. Los resultados de las investigaciones realizadas en el observatorio Auger confirmaron esta hipótesis. Se estableció entonces que las direcciones con que arriban estos rayos cósmicos no están distribuidas de manera uniforme en el cielo, sino que predominan las próximas a las posiciones celestes de galaxias relativamente cercanas y dotadas de núcleos activos.

El Observatorio Pierre Auger, pionero en este campo de investigación, cuenta con 24 telescopios de fluorescencia y 1600 WCD cubriendo una superficie de recolección de datos de  $16000$  m<sup>2</sup>, sin embargo su ubicación a tan sólo 1400 m.s.n.m, limita su eficiencia para la detección de los GRB más energéticos a causa de la absorción atmosférica.

Con el fin de liberarse de esta limitación, se convino en mantener detectores utilizando el método de la partícula individual. Esto permite utilizar fototubos a más alta ganancia, con niveles de disparo más bajos y, con la ventaja adicional de aumentar el flujo de datos. Los WCD son una alternativa muy buena para desarrollar una colaboración en la detección de GRB en nuestros países [7].

El instrumental requerido tiene costos manejables dentro de las disponibilidades financieras de grupos y centros de investigación de las universidades en América Latina. Adicionalmente, la cordillera andina facilita colocar este tipo de detectores a alturas considerables, con lo cual se minimiza el efecto de interferencia atmosférica en la detección de los GRB.

Las simulaciones muestran que 20 m<sup>2</sup> de detectores Cherenkov con agua en Chacaltaya (5200 m.s.n.m.) son equivalentes a los 16000 m<sup>2</sup> de área afectiva del Pierre Auger. La gran mayoría de las partículas secundarias remanentes producidas por un gamma primario, serán fotones. Por ello es que la utilización de detectores Cherenkov es preferible a los centelladores u otros detectores de partículas cargadas [8].

La detección de GRBs de energías del orden de los GeV, es posible en detectores en tierra correlacionados con los registros de satélite, mediante la técnica de la observación de las fluctuaciones de los registros temporales de la radiación de fondo de cada detector debido al arribo de partículas secundarias, mayoritariamente fotones, sobrevivientes del chubasco generado en el tope de la atmósfera por los rayos gamma de un GRB que llegan durante el corto periodo de tiempo de duración del mismo.

Este método se conoce como "Single Particle Technique" (SPT, Técnica de partículas individuales) [10]. Cuando los fotones de un GRB alcanzan la atmósfera, producen chubascos de rayos cósmicos, sin embargo, sus energías no son suficientes para producir chubascos detectables en tierra (ni siquiera a grandes alturas). Sin embargo, se espera que lleguen muchos fotones en un periodo corto de tiempo. Entonces se podrá ver un incremento en la razón de conteo de la radiación de fondo en los detectores durante ese periodo de tiempo. Esta técnica ya se aplicó en INCA, en Chacaltaya, y en ARGO, en Tíbet [8].

El proyecto LAGO consiste en instalar una red de estaciones terrestres para detectar fotones de alta energía provenientes de las explosiones de rayos gamma, utilizando la SPT con detectores Cherenkov con agua. Para alcanzar una sensibilidad razonable, se han seleccionado sitios de altura en Sierra Negra (4650 m.s.n.m.) en Puebla-México, Chacaltaya (5230 m.s.n.m.), en La Paz-Bolivia, Pico Espejo (4765 m.s.n.m.) en Mérida-Venezuela. También hacen parte de la red los detectores de AUGER en Malargue-Argentina (1400 m.s.n.m.). En Perú se están ubicando posibles sitios de altura cerca de Cusco para instalar otra estación de la red LAGO y se ha presentado una propuesta para instalar detectores en la "Pirámide" del CNR en el Everest (5050 m.s.n.m.), finalmente se logró implementar un detector en San Juan de Pasto, Colombia (2600 m.s.n.m.).

Los WCD pueden tener variadas geometrías, pero típicamente son tanques llenos de agua ultra pura con una profundidad entre 1.2 y 1.5 m que garantiza el registro de una partícula. Cada WCD replica la idea de los WCD de Pierre Auger. Esto es que están tapizados internamente por un material difusor y dispone de un fototubo conectado a la electrónica de adquisición. Las señales digitales son procesadas por un equipo especial que está programado para tomar lecturas cada 5 ms. Los datos son capturados y almacenados por un PC vía un puerto serial.

## **2. Metodología**

El proyecto LAGO tiene varias particularidades que lo hacen atractivo y emocionante. Es un experimento que involucra física de altas energías y astrofísica que a la vez es de muy bajo costo. Los detectores son tanques con agua en los cuales se instalan tubos fotomultiplicadores y se incorpora la electrónica necesaria para recolectar los datos.

Como se ha mencionado, este tipo de detectores también pueden ser utilizados para investigar la actividad solar, el monitoreo climático e incluso un método experimental que puede ser incorporado al estudio de la actividad sísmica.

El hecho que en general se requiera la instalación de los detectores Cherenkov en altura es porque las astropartículas interactúan con la atmósfera y mientras más cerca del nivel del mar está el detector, más pobre es la detección de las mismas. Por lo que la situación ideal es llevar el detector a una buena altura, por ejemplo, a una montaña. En nuestro

caso, se buscará instalar el detector en las instalaciones de la Universidad de Nariño y a una altura de referencia del orden de 2600 (m.s.n.m).

Para lograr adecuar el tanque - detector se requirieron seguir los siguientes pasos:

### 2.1. Primera Fase: inclusión al proyecto LAGO

1) El primer paso fue firmar el documento de Acuerdo de Entendimiento, el cual demostró el compromiso de la Universidad y de la Colaboración para con el proyecto. El documento fue firmado por las dos partes: la Universidad de Nariño y el IP (investigador principal) de LAGO.

2) Contacto permanente con el IP de LAGO con el fin de ratificar el mejor lugar de colocación del detector y seguimiento de las condiciones del mismo. Se realizó una visita para estos fines a la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito – Ecuador, donde además se cumplieron los siguientes propósitos:

- Conocer al grupo de trabajo de la Escuela Politécnica Nacional y de la Universidad San Francisco de Quito.
- Visitar las instalaciones de los detectores de agua Cherenkov.
- Familiarizar al grupo de trabajo de Pasto con la electrónica utilizada por los detectores.

### 2.2. Segunda Fase: adquisición de materiales básicos

1) Se adquirió el tanque el cual se llenó con agua. En realidad el tanque no es más que el que se utiliza para el almacenamiento de agua en las casas. La capacidad es de 2 metros cúbicos, es decir, 2000 litros, Figura 1. Esta capacidad es la necesaria para poder analizar los fenómenos requeridos.

Figura 1. Tanque para el almacenamiento del agua en el WCD.



2) Se adquirió mediante importación el tubo fotomultiplicador: en este paso se presentaron algunos inconvenientes debido a la dificultad de realizar la importación y lograr la entrada del equipo a Colombia debido a su costo. Por ello se ha trabajado con un tubo fotomultiplicador donado por la colaboración internacional LAGO en la visita (participación como conferencistas) a la ciudad de La Paz Bolivia, Figura 2.

Figura 2. Entrega tubo fotomultiplicador donado por la colaboración LAGO en La Paz – Bolivia.



3) Se adquirió la electrónica propia de LAGO la cual fue asesorada por la colaboración y también se adquirió la nueva tecnología basada en la denominada RED-Pitaya, ver Figura 3.

Figura 3. Tarjeta Red Pitaya adquirida mediante importación.



4) Se adquirieron los elementos para la protección del detector. Plástico blanco para el recubrimiento interior (tyvek) que hace posible la reflexión interna.

5) Se adquirió el material necesario para la purificación del agua y para el recubrimiento del tanque, es decir, el plástico negro convencional.

### *2.3. Tercera Fase: capacitación para la instalación y calibración por parte de la colaboración LAGO*

1) Visita de personal especializado a la Universidad de Nariño para realizar una capacitación general al grupo de trabajo con el fin de comenzar la instalación del detector. Dado que no fue posible recibir la visita desde afuera, fue el grupo de trabajo de Pasto quienes asistieron a los siguientes eventos:

- Quito – Ecuador – Escuela Politécnica Nacional – Vista técnica al grupo LAGO Ecuador.
- Quito – Ecuador – Universidad San Francisco de Quito – Taller RedPitaya.
- La Paz – Bolivia – Universidad Mayor de San Andrés – Conferencistas Estado LAGO – Pasto.

### *2.4. Cuarta Fase: instalación del tanque*

1) En primer lugar se decidió que la sede Torobajo en las inmediaciones del bloque nuevo de laboratorios es un buen lugar para la ubicación final del tanque detector. Se realizó el recubrimiento del interior del tanque con un material sintético blanco, ver Figura 4. Eso ayuda a reflejar la radiación Cherenkov en las paredes y el fondo del tanque, ayudando a que la señal detectada sea un poco más fuerte.

Figura 4. Recubrimiento interior del tanque con el tyvek.



2) Se realizó el llenado de agua del tanque y el respectivo tratamiento. El agua debe ser purificada para evitar la contaminación y tener que hacer recambios continuos de la misma. Una vez el agua deba ser cambiada debe sacarse toda la instalación y proceder a realizar una nueva.

3) Para asegurar el correcto funcionamiento del tubo Fotomultiplicador (el que fue facilitado por la colaboración LAGO en Bolivia), que por supuesto detecta fotones (luz) se debe elaborar una previa caracterización del sensor. Para ello se construyó una caja negra “dark box”, Figura 5, y se procedieron a realizar pruebas de luz con un instrumento diseñado para tal fin. Los resultados se mostrarán en la discusión. La caracterización se realizará con el nuevo tubo fotomultiplicador ya que con los que actualmente se cuenta no es necesaria porque ya han sido usados para la detección de radiación Cherenkov con éxito.

Figura 5. Prueba de luz realizada en la dark box para la caracterización posterior del PMT. La caja fue elaborada por los estudiantes Daniel Benavides y Mario Cáceres de la Institución Universitaria CESMAG quienes también tienen un acuerdo con LAGO.



4) Instalación del tubo fotomultiplicador donado en la parte superior del tanque de agua. Esta etapa es de mucho cuidado ya que se requiere que el tubo encaje perfectamente y no exista entrada de luz exterior lo cual generaría ruido y falsas señales. También se aseguró que el tubo haya quedado justo sobre el nivel del agua y debe evitarse el contacto con la misma para evitar la oxidación y humedad. Ver Figura 6.

Figura 6. PMT en el tanque de agua.



5) El siguiente paso fue probar la tarjeta de adquisición, el software, hardware y la electrónica en general. El grupo de investigación implementó una tarjeta digitalizadora que sustituye a la anteriormente utilizada por LAGO. Esta digitalizadora será conectada a la Red Pitaya que sustituye la Nexys 2 usada antes por LAGO y que ahora es muy difícil de encontrar.

### 2.5. Quinta Fase: calibración

1) Se realizó la calibración utilizando las técnicas sugeridas por los expertos de LAGO. Referimos los siguientes documentos importantes:

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1708/1708.05371.pdf>

[http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/images/TN\\_LAGO\\_2011\\_004.pdf](http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/images/TN_LAGO_2011_004.pdf)

## 3. Análisis y Resultados

Los resultados más importantes obtenidos a partir de la ejecución del proyecto hasta el momento fueron:

- 1) Obtención del documento Memorando de Entendimiento entre la Colaboración LAGO y la Universidad de Nariño. Este documento consolida la alianza con toda una red de investigadores e instituciones que harán posible en el futuro el intercambio de experiencias académicas y la movilidad estudiantil, entre otras cosas.
- 2) Adquisición de todos los elementos que hacen posible la instalación de un tanque detector a bajo costo y que además puede servir como un montaje de laboratorio para comprender el manejo masivo de datos y su tratamiento computacional.
- 3) Comprender el manejo de la electrónica involucrada en el experimento y obtención de un nuevo tipo de electrónica más eficiente que la convencional usada por LAGO. En este punto se reemplazó la tarjeta Nexys 2 por la tarjeta Red Pitaya e igualmente se implementó una nueva tarjeta digitalizadora.
- 4) Afianzar el conocimiento sobre los rayos cósmicos, las astro partículas y todo lo relacionado con los propósitos teóricos físicos de la colaboración.
- 6) Lograr hasta el momento, establecer correctamente la calibración del equipo, y simular computacionalmente el flujo de partículas a nivel de la superficie de la ciudad de San Juan de Pasto situada a una altura de 2530 (m.s.n.m). El equipo de investigadores creó una simulación conducente a obtener dicha información.

## 4. Discusión

De acuerdo a los objetivos específicos planteados en el proyecto, comentamos lo siguiente:

1) Instalar en la Universidad de Nariño un tanque detector Cherenkov en agua, que a futuro esté destinado al estudio de diferentes fenómenos de interacción que involucren astropartículas.

Fue posible adecuar el tanque detector Cherenkov, con el recubrimiento interior, el recubrimiento exterior, la instalación de la electrónica y el tubo fotomultiplicador. Se realizó una primera instalación con un tratamiento previo del agua utilizando cloro y dejando reposar por varios días para esperar la decantación de los sedimentos. Hay que tener en cuenta que existe dificultad para colocar el PMT dentro del tanque y evitar el contacto de la electrónica con el agua que puede oxidar los componentes, también fue necesario varias capas del recubrimiento de plástico negro para evitar las entradas de luz. Dado el grado de pureza del agua de Pasto, el tratamiento con unas pequeñas gotas de cloro y la decantación fueron suficientes para obtener la pureza deseada. El mantenimiento del tanque es un poco difícil ya que con el tiempo se hace necesario cambiar el agua y volver a realizar toda la instalación.

2) Realizar encuentros de capacitación e intercambio de información con los expertos de la colaboración LAGO y miembros de las demás estaciones.

Fue posible que parte de los investigadores asistan a los diferentes encuentros que se originaron durante el tiempo de ejecución del proyecto.

El primer encuentro en Quito fue indispensable para conocer un punto de la colaboración LAGO en Ecuador y familiarizarnos con el proceso que ellos han tenido que llevar para instalar el tanque en su universidad. Se observó que al igual que Colombia, Ecuador tiene problemas con la importación de equipos. También ellos decidieron reemplazar la nexys 2 por una nueva tarjeta que sea más comercial y por lo tanto más fácil de adquirir.

El encuentro en La Paz Bolivia logró consolidar la firma del MOU y adquirir el PMT inicial.

El segundo encuentro en Quito, fue un taller encaminado al uso y beneficios de la tarjeta Red Pitaya. Al ser una tecnología nueva requiere de instrucciones, foros y socialización del conocimiento.

3) Realizar la respectiva calibración del tanque – detector, de tal manera que permite comenzar la adquisición de datos confiables.

#### **A. Construcción de la dark box para posteriormente realizar la caracterización del PMT (nuevo) y que sea de confiabilidad para la investigación.**

Se construyó la dark box (caja negra), que consiste de una caja con una cobertura negra en su interior y con un sistema de sellado que propende por tener cero luminosidad cuando está cerrada. Con ayuda de un luxómetro se verificó que realmente no hay entrada de luz al interior de la caja y que por lo tanto sirve para dicha caracterización. Para probar si entró algo de luz en el interior de la caja, se colocó un luxómetro vía una sonda y se cerró completamente la dark box, el luxómetro marcó cero en todo momento, Figura 7.

Además se utilizó un espectrómetro con fibra óptica suministrado por el laboratorio de física, e igualmente no se detectó ninguna señal.

Figura 7. Prueba de luminosidad dentro de la dark box para la caracterización del PMT.



Además se utilizó un espectrómetro suministrado por el laboratorio de física, e igualmente no se detectó ninguna señal.

Se realizó una simulación de la ley de cuadrado inverso dentro de la caja utilizando como fuente de luz una serie de

LEDs cuyo funcionamiento (prender/apagar) se controlaba desde el exterior. Como receptor se colocó la fibra óptica del espectrómetro y además se contó con un mecanismo que acercaba la fuente de luz al detector en una resolución de milímetros, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Prueba de ley del cuadrado inverso dentro de la dark box, utilizando una fuente de luz (LED) y un espectrómetro como detector.



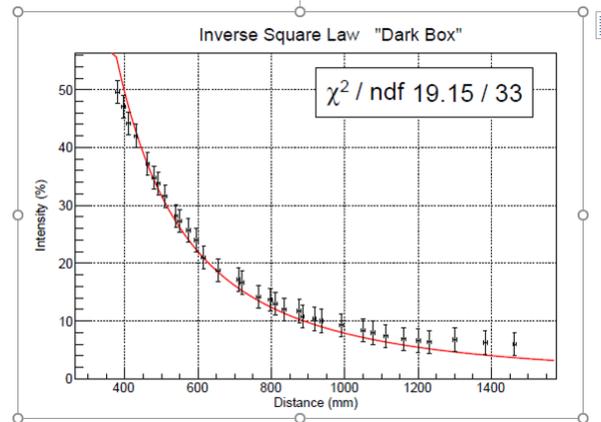
Los datos obtenidos de luminosidad (%) Vs distancia (mm) son los que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1  
Datos ley del inverso al cuadrado en la dark box

d (mm)	I (%)	$\Delta d$ (mm)	$\Delta I$ (%)	d (mm)	I (%)	$\Delta d$ (mm)	$\Delta I$ (%)
1463	8	5	0.9	655	20.8	5	0.9
1383	8.3	5	0.9	615	23.0	5	0.9
1300	8.8	5	0.9	595	24.0	5	0.9
1230	9.4	5	0.9	573	25.7	5	0.9
1200	9.6	5	0.9	550	27.3	5	0.9
1160	9.9	5	0.9	540	28.2	5	0.9
1111	10.4	5	0.9	510	31.6	5	0.9
1077	11	5	0.9	492	33.7	5	0.9
1050	11.4	5	0.9	480	34.8	5	0.9
990	12.3	5	0.9	462	37.2	5	0.9
936	13.0	5	0.9	430	42.0	5	0.9
917	13.4	5	0.9	410	44.2	5	0.9
885	13.8	5	0.9	397	47.1	5	0.9
876	14.7	5	0.9	380	49.6	5	0.9
835	15.0	5	0.9	375	51.9	5	0.9
810	16.0	5	0.9	355	56.0	5	0.9
797	16.7	5	0.9	340	59.8	5	0.9
765	17.2	5	0.9	305	69.0	5	0.9
720	18.7	5	0.9	275	80.7	5	0.9

Con los datos de la tabla anterior se construyó la gráfica de Intensidad Vs. Distancia. Ver Figura 9. Se puede notar que la curva es muy buena, con un óptimo ajuste dado por el chi cuadrado y que por lo tanto el dispositivo se puede utilizar como un caracterizador de detectores.

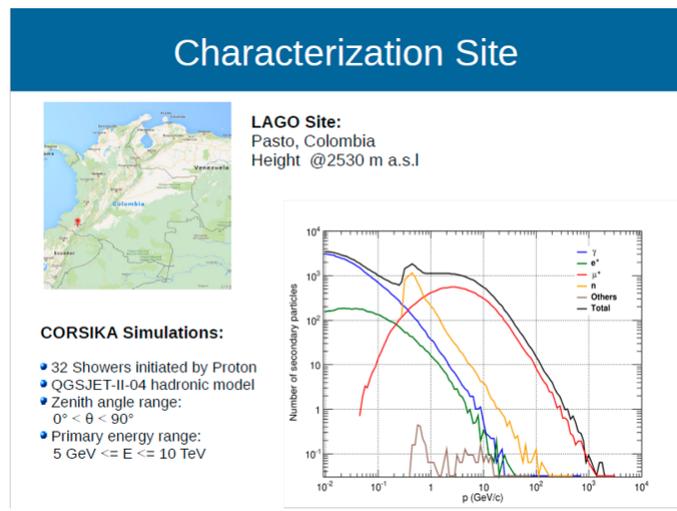
Figura 9. Ley del cuadrado inverso dentro de la dark box.



### B. Obtención de la fluencia - número de partículas a nivel del suelo

Utilizando el software CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAScade) [9], se logró determinar el flujo de partículas por unidad de tiempo (fluencia) a nivel del suelo de San Juan de Pasto. Es decir, el número y tipo de partículas que llegarían al suelo a la altura de 2530 msnm, tomando como partida un protón de energía entre 5 GeV y 10 TeV, el resultado se puede observar en la Figura 10. En el caso de los neutrones, el pico mayor de cerca de

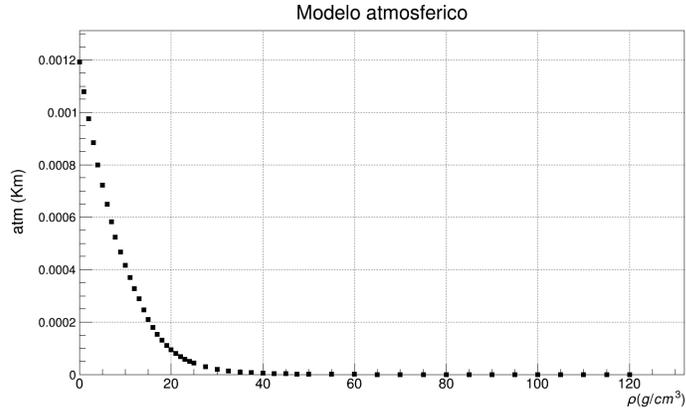
Figura 10. Caracterización del sitio del detector.



1000 partículas, se originan con un protón de aproximadamente 1 GeV/c. Para los fotones, el pico máximo de cerca de 10000 partículas se encuentra para energía mucho menores, cerca de los 0.01 GeV/c. El punto máximo de los muones, para protones de aproximadamente 10 GeV/c, está en cerca de 1000 partículas de este tipo.

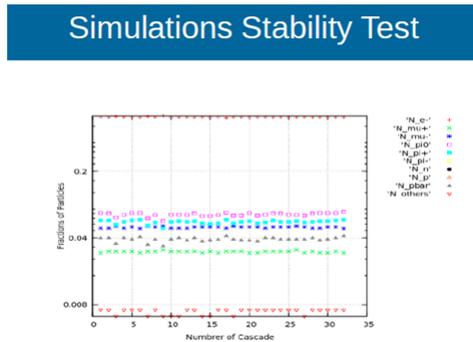
El anterior cálculo de cómputo requiere un modelo de la atmósfera, Figura 11. El considerado es el siguiente:

Figura 11. Modelo atmosférico utilizado, se muestra la forma en que varía la densidad con la altura en km.



También se realizó un test de estabilidad, que demuestra la confiabilidad en la simulación. Esto implica que las fracciones de partículas que llegan al detector, permanece constante al aumentar el número de cascadas, Figura 12.

Figura 12. Comprobación de la estabilidad de las simulaciones.



### C. Histograma de Carga

Actualmente, para calibrar los detectores de LAGO se suele utilizar el pico secundario del histograma de carga para inferir directamente la distribución de carga del VEM (Muon Vertical Equivalente).

Se tiene que las partículas que atraviesan el detector depositan energía que es detectada en unidades de Voltaje. Considerando que se toma datos cada cierto tiempo en nano segundos, se puede obtener la carga depositada por la partícula.

Al no tener el PMT principal, o el último con el que se espera contar, el proceso de calibración no se realizó de manera total. Los datos de ingreso son:

- Altura a la que se encuentra el detector: 2530 m.s.n.m.
- Número y ubicación de los PMT's: 1 PMT centrado en la parte superior del detector.
- Volumen de detector:  $0.134 \text{ m}^3$
- Superficie del PMT:  $19.635 \text{ pulgadas}^2$ .
- Los procesos que se consideran para la simulación son: Para fotones: Compton y producción de pares. Para electrones: Radiación Cherenkov, dispersión múltiple, Bremsstrahlung, ionización. Para muones: Radiación Cherenkov y Rayos  $\delta$ . En cada simulación el flujo relativo es de 30 % muones, 23 % electrones/positrones y 47 % gammas.

- Las simulaciones permiten obtener varios modelos físicos y por lo tanto son de gran confiabilidad.

4) Fomentar el trabajo multidisciplinario con los profesores y estudiantes de los programas de Ingeniería Electrónica y Sistemas.

El proyecto LAGO constituye una colaboración de gran importancia para la investigación en física de astro partículas y el hecho de pertenecer a dicha organización hace resaltar la calidad investigativa de la Universidad de Nariño. A partir de la incorporación mediante la firma del acuerdo de entendimiento será posible la realización de más actividades académicas que fomenten el intercambio estudiantil y la visita a las estaciones LAGO para la socialización de resultados.

Es importante anotar que el equipo además se convierte en un instrumento de laboratorio para que los estudiantes de primeros semestres de física e ingeniería, adquieran una gran habilidad en el manejo de enormes cantidades de datos, sepan interpretar gráficas y se familiaricen con un evento tan común pero a la vez tan extraño como los rayos cósmicos.

Se han afianzado y complementado los conocimientos teóricos sobre el estudio de los rayos cósmicos, las astro partículas y esto a permitido retroalimentar los conocimientos entre los diferentes grupos de investigación nacionales e internacionales que hacemos parte de la colaboración LAGO.

Anotamos que los procesos de importación de equipos dificultan enormemente el rendimiento del proyecto y su pronta ejecución. Si no hubiera sido por los instrumentos donados, que no son los óptimos, el proyecto aún no hubiera pasado esta primera fase. Se espera la pronta llegada definitiva del instrumento original para que los resultados sean aún mejores.

## 5. Conclusiones

- Una vez ejecutado el proyecto de investigación denominado "Inclusión de la Universidad de Nariño a la colaboración LAGO (Large Aperture Gamma Ray Burst Observatory) a través del Diseño, Construcción, e Instalación de un Tanque - Detector Cherenkov", podemos concluir que se cuenta con un convenio internacional, conducente a la producción de excelentes experiencias académicas de intercambio y colaboración interinstitucional.
- Comprobamos que es posible a partir de instrumentos de bajo costo, construir un detector de partículas de alta energía que es eficiente y útil dentro de los requerimientos experimentales que se han planteado dentro de la colaboración.
- A partir de simulaciones computacionales utilizando el software especializado CORSIKA fue posible encontrar el flujo de partículas a nivel del suelo en la ciudad de San Juan de Pasto. Este dato es importante para las expectativas de colocar detectores a esta altura sobre el nivel del mar.
- Es necesario seguir buscando alternativas para la electrónica del proyecto debido a que los primeros dispositivos utilizados ya no son comerciales y resultan extremadamente difíciles de conseguir. La alternativa y el trabajo desarrollado de la RED-Pitaya y la digitalizadora, son por tanto resultados novedosos e importantes dentro del proyecto que permitirá la incorporación de esta tecnología.

## 6. Recomendaciones

- Consideramos que los procesos de importación de equipos destinados a la investigación dificulta enormemente el avance de los proyectos y su pronta ejecución. Por tanto, este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo decidido de la colaboración LAGO que realizó la donación de un tubo fotomultiplicador de segunda mano, el cual permitió el avance y culminación de este proyecto. Se espera la pronta llegada del instrumento fotomultiplicador original adquirido para que los resultados sean aún mejores.
- Es recomendable que en un futuro se instalen más tanques detectores tipo Cherenkov que permitan realizar otro tipo de investigaciones en el área de la física y también en la ingeniería y que aporte aún más a la colaboración internacional LAGO.

- Es recomendable intentar la instalación de un tanque detector a más altura sobre el nivel del mar, por ejemplo, se puede considerar la cima del volcán Galeras, ya que entre más altura se espera una mayor probabilidad de eventos de interés para la física de rayos cósmicos principalmente.
- Igualmente se recomienda continuar trabajando con la tarjeta de adquisición de datos RED-Pitaya y con el proyecto de implementación de una tarjeta digitalizadora realizada en trabajo interdisciplinario por estudiantes de la Universidad Cesmag.

## Referencias

- [1] <http://lagoproject.net/>
- [2] Asorey, H., & Dasso, S. (2016). LAGO: the latin american giant observatory. *PoS*, 7-15.
- [3] Allard, D., Allekotte, I., Alvarez, C., Asorey, H., Barros, H., Bertou, X., ... & Murrieta, T. (2008). Use of water-Cherenkov detectors to detect gamma ray bursts at the Large Aperture GRB Observatory (LAGO). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 595(1), 70-72.
- [4] Durán, M. S. (2011). Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar.
- [5] Velarde, A., Ticona, R., Miranda, P., Rivera, H., & Quispe, J. (2009). Proyecto lago bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 15(15), 32-38.
- [6] <https://docplayer.es/95131037-Propuesta-para-el-desarrollo-de-la-comunidad-virtual-\lago-large-aperture-gamma-ray-burst-observatory.html>
- [7] Nuñez, L. A., Quiñonez, F., & Cano, C. A. S. (2013). Validación del linaje de los datos de la colaboración LAGO. *Instalaciones Sierra Negra y Chacaltaya. Iteckne*, 10 (1).
- [8] Velarde, A., Ticona, R., Miranda, P., Rivera, H., & Quispe, J.. (2009). PROYECTO LAGO BOLIVIA. *Revista Boliviana de Física*, 15(15), 32-38. Recuperado en 11 de julio de 2019, de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1562-38232009000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232009000100006&lng=es&tlng=es).
- [9] Aguilar, L. R. T. Simulación de Cascadas Aéreas Extensas en CORSIKA para la Colaboración LAGO en Guatemala.
- [10] Aglietta, M., Alessandro, B., Antonioli, P., Arneodo, F., Bergamasco, L., Fauth, A. C., ... & Cini, G. (1993). UHE cosmic ray event reconstruction by the electromagnetic detector of EAS-TOP. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 336(1-2), 310-321.