

Radiación Cósmica y Precursores Sísmicos*

Una iniciativa merideña en Sistemas de Alerta Temprana en Terremotos, que se viene investigando en el Departamento de Física de la Universidad de Los Andes, con el apoyo del Laboratorio de Geofísica de esta Universidad. La investigación busca combinar variables sísmicas, geomagnéticas y la medición del flujo de radiación cósmica de alta energía, en un intento por establecer un sistema de monitoreo que permita anticipar la ocurrencia de un evento sísmico inminente.

*Misael D. Rosales, Jaime R. Lafaille, Martín A. Rengifo, Carlos E. Guada, Luis A. Núñez, Alejandra L. Melfo, Juan C. Villegas y Arturo J. Espinoza **

La importancia de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) se puso en evidencia con el tsunami del Océano Índico en 2004 [1], uno de los desastres más terribles de las últimas décadas: 230.000 personas fallecidas, calamidad que pudo aminorarse de haberse contado con un SAT. Este no es un caso aislado, en general las zonas de alto riesgo sísmico no disponen de sistemas eficientes de alerta temprana. Incluso, países con grandes desarrollos en materia de conocimiento acerca del tema de los SAT, han sufrido las consecuencias de la acción de amenazas naturales que no fueron convenientemente “avisadas”, o que su acción fue menospreciada; siendo un caso emblemático lo ocurrido con el terremoto y tsunami de Japón del año 2011 [2]. En este último caso se estiman en más de 20.000 los fallecidos, millones de dólares en pérdidas económicas y más de 300.000 desplazados y afectados por causa de los daños sufridos por la planta nuclear de Fukushima.

Estos sistemas incluyen tres elementos, a saber: a) Conocimiento y mapeo de amenazas. b) Monitoreo y pronóstico de eventos inminentes y c) Proceso y difusión de alertas a las autoridades políticas y a la población, quien debe ser partícipe del proceso de respuesta a los SAT. Se ha logrado un desarrollo aceptable de la primera fase, pero la segunda es compleja y requiere de una gran inversión de recursos humanos y financieros.

Esta propuesta apunta justamente al segundo elemento, es decir, impulsar una investigación en la

dirección de proponer un esquema de trabajo que resuelva el nudo crítico de esta segunda fase para el caso sísmico, es decir, un Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana de Eventos Inminentes, lo que constituye un gran reto tecnológico en importantes áreas del conocimiento. La propuesta debe estar orientada a: producir, procesar, almacenar, intercambiar y divulgar información útil para activar acciones de mitigación y reacción ante terremotos, a fin de minimizar pérdidas de vidas e infraestructuras civiles y productivas en las poblaciones que hacen vida sobre el cinturón sísmico nacional, vale decir, más de 12 millones de personas.

Desde hace cinco años aproximadamente, se investiga en el Departamento de Física de la Universidad de los Andes, con el apoyo del Laboratorio de Geofísica, la posibilidad de combinar variables sísmicas, geomagnéticas y la medición del flujo de radiación cósmica de alta energía, en un intento por establecer un sistema de monitoreo que permita anticipar la ocurrencia de un evento sísmico inminente.

Los resultados son muy prometedores y nos permiten afirmar que existe una posibilidad cierta de usar las variaciones del flujo de radiación cósmica, como un precursor sísmico viable, a los efectos de transformar esta iniciativa en una propuesta concreta de un monitor de sismos inminentes, como parte de un sistema de alerta temprana, que pueda ser confirmada a mayor escala y puesta en funcionamiento en otras regiones sísmicas del país y/o del mundo.

*El presente texto fue terminado en el año 2014, año posterior a la fecha que se indica como fecha de publicación de la presente edición N° 27-28 de la Revista Investigación.

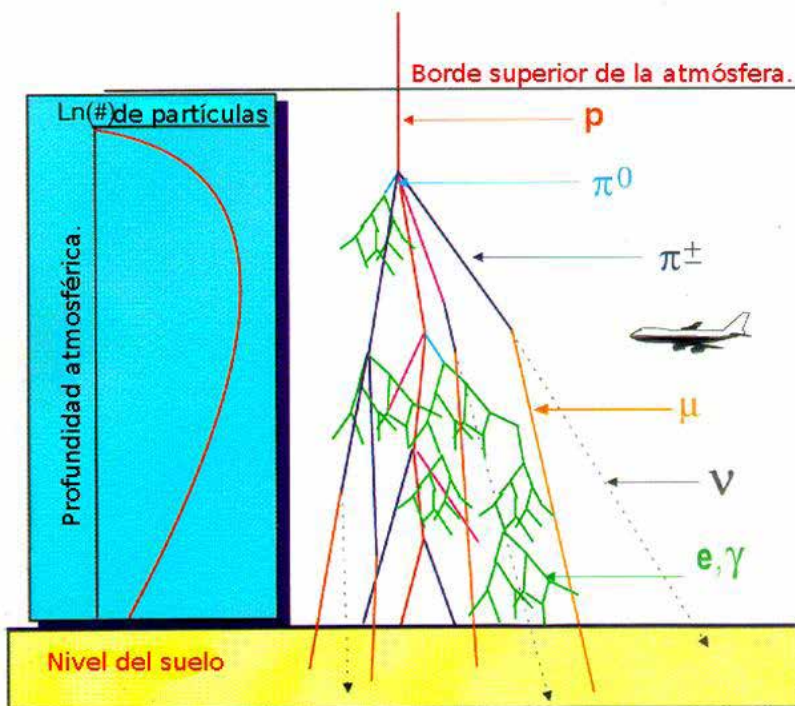
Bases conceptuales de la propuesta

La radiación cósmica

Definida como la radiación de alta energía proveniente del universo y que ha bombardeado la tierra por millones de años. Aunque su estudio sólo lleva alrededor de 100 años, durante este tiempo se han estimulado y desarrollado nuevos campos que han permitido su comprensión, como es el caso de la física de partículas [1,2].

Una cascada de partículas, se genera cuando la radiación cósmica de alta energía incide sobre la atmósfera terrestre, esta radiación cósmica puede estar compuesta principalmente por rayos gamma, protones o núcleos atómicos. Dada las enormes energías que poseen estas partículas, ($>10^{15}\text{eV}$) al impactar, sobre átomos que conforman la atmósfera terrestre generan un subconjunto de partículas secundarias producto de las interacciones nuclea-

res entre las mismas, estas partículas secundarias a su vez impactarán sobre otras partículas circundantes y éstas con otras, generando una reacción progresiva (Fig 1a). El número de partículas totales crece rápidamente a medida que se genera la cascada, posteriormente el número de partículas alcanza un máximo y empieza a disminuir paulatinamente a medida que la cascada se aproxima a la superficie terrestre, esto debido a que la energía de la partícula primaria se va disipando, producto de los mecanismos de interacción involucrados en el proceso de formación de la cascada. La evolución de la cascada de partículas depende de las características de la partícula primaria de su naturaleza química, energía inicial, ángulo de incidencia y en cierta medida de las condiciones atmosféricas locales [1,2].



Cascada de partículas ("EAS").

Fig 1a. Un protón cósmico en el borde superior de la atmósfera genera una cascada de partículas.

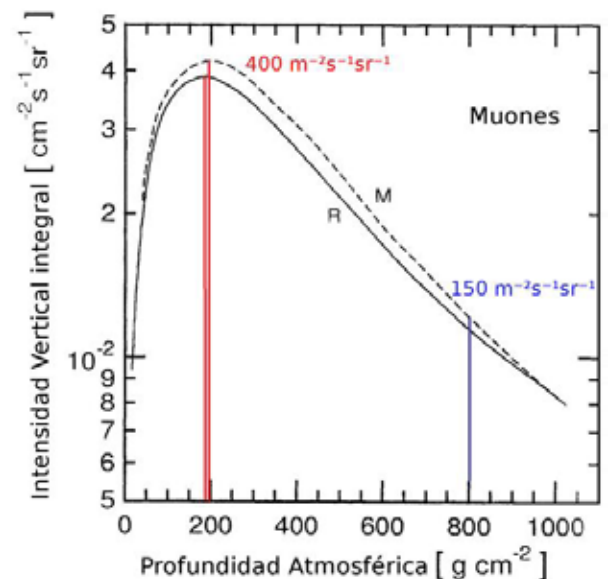


Fig 1b. Número de muones en Mérida 150 [m^2/seg]

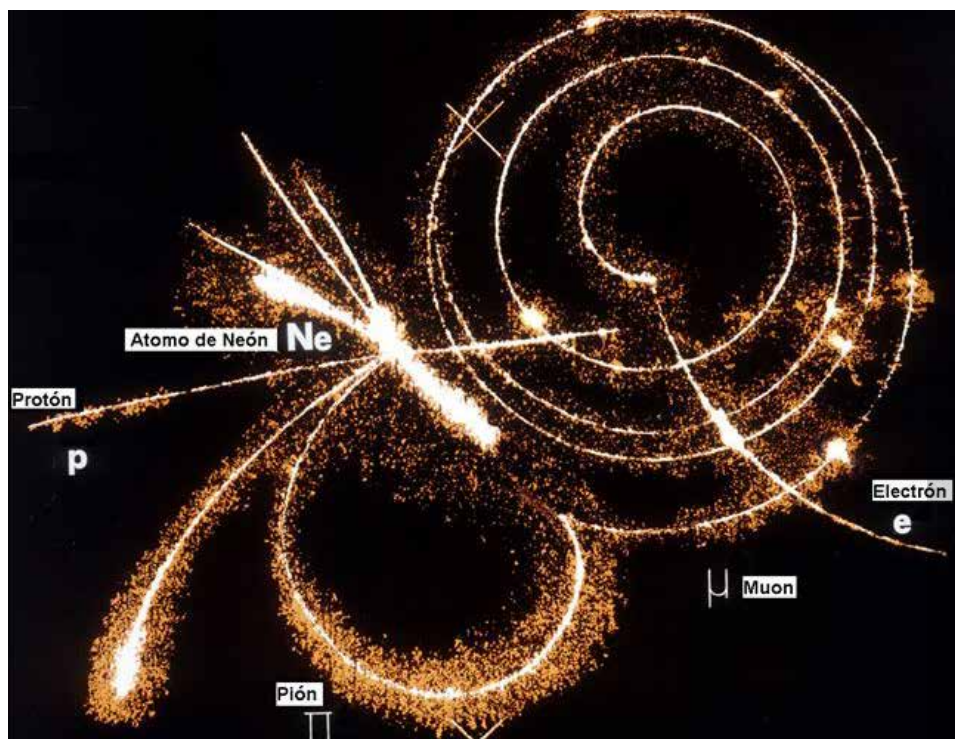


Fig 2a. Generación de un muon en la colisión de un protón con un núcleo de Neón, en presencia de un campo magnético perpendicular a esta hoja.

Muones en Mérida

Una de las partículas generadas en la cima de la atmósfera (~15 Km) en una cascada de radiación cósmica, y que es de especial interés en nuestro estudio, dada su abundancia y alta sensibilidad a las variaciones de campo geomagnético, son los muones (μ). Los Muones son partículas que se forman de la interacción de protones de la radiación cósmica con los átomos de la atmósfera (Fig 2a). Poseen una carga igual a la del electrón y una masa en reposo de 105.7 MeV, al ser partículas inestables éstas tienden a decaer en otras partículas subatómicas, poseen un tiempo de vida media de $\sim 2.2 \mu\text{s}$, pero el hecho de viajar a velocidades cercanas a la velocidad de la luz les permite recorrer grandes distancias antes de decaer. Su interacción con la materia es muy débil, lo que les facilita penetrar grandes profundidades en las rocas, al punto de ser utilizadas en la actualidad en la tomografía de volcanes a los efectos de estudiar sus futuras erupciones [3].

La densidad de muones en Mérida (1.893 m.s.n.m. con una profundidad atmosférica de 800 gr/cm^2) representa el 70.42% del total de partículas, los electrones el 28.17% y los protones el 1.41% (fig 2b). El hecho de que los muones sean tan abun-

dantes a esta altura nos permite tener un conteo de partículas del orden de $150 \text{ [m}^2/\text{seg]}$ (Fig 1b) [1–2,16–17,19], que es estadísticamente muy favorable para los propósitos experimentales de nuestro interés.

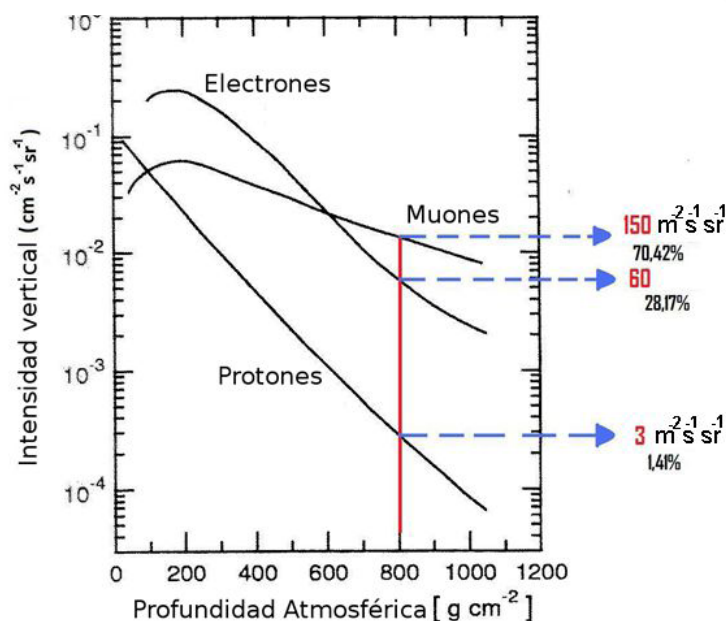


Fig 2b. Densidad de electrones, muones y protones vs profundidad atmosférica.

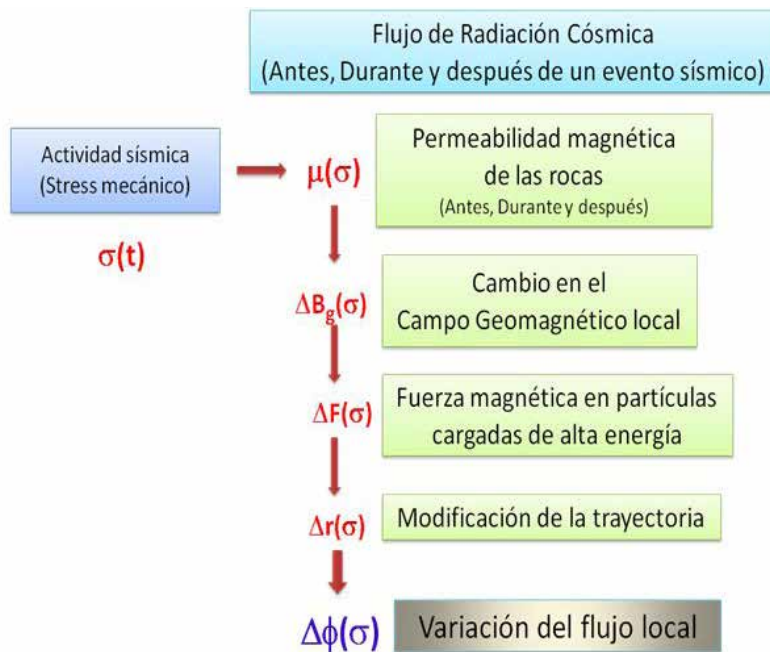


Fig 2a. Actividad sísmica y flujo de muones

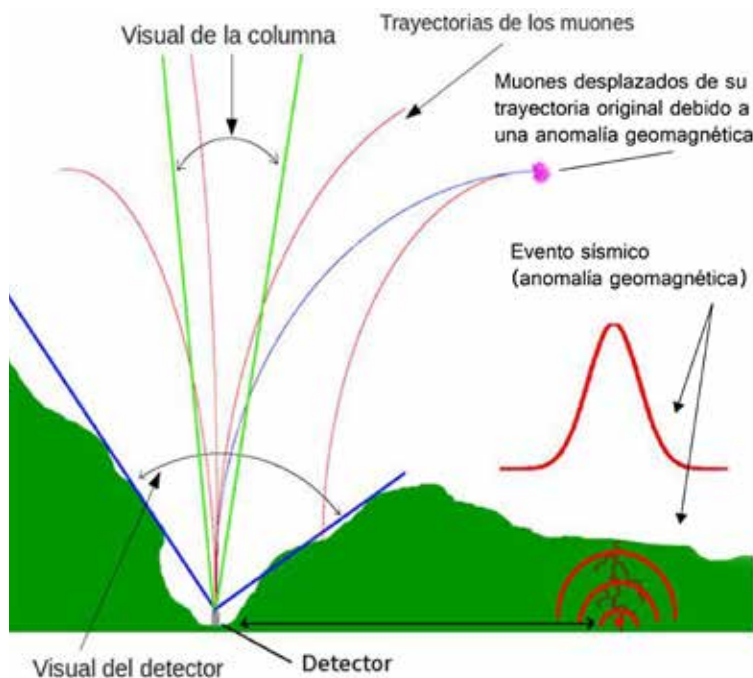


Fig 2b. Sísmicidad local y trayectoria de los muones

Flujo de muones y sísmicidad

El flujo asistemático de partículas cargadas (muones) generados por la Radiación Cósmica con energías superiores a 2 GeV puede ser modificado: antes, durante y después de un evento sísmico local. Partimos del hecho, de que el stress mecánico (σ) al que están expuestas las rocas durante un episodio sísmico, modifica su permeabilidad magnética (μ_B) al generarse micro-fracturas y/o cambios en su densidad, estableciéndose por tanto “fugas y/o sumideros” del flujo geomagnético [7–16]. Esta modificación local cambia la magnitud y dirección del campo geomagnético (ΔB_g), afectando por tanto la trayectoria (Δr) de partículas cargadas de alta energía sobre la superficie terrestre, lo que se manifiesta como un cambio en el flujo ($\Delta \phi$) real de partículas, en la vecindad del evento (Fig 2a).

La acumulación progresiva de energía mecánica en el sitio de la fractura, promueve también una variación gradual en la permeabilidad magnética de la roca, por lo tanto: Antes del evento sísmico, que se consagra a posteriori con la fractura de la roca, debería entonces observarse una variación importante en las “fugas y/o sumideros” del campo geomagnético, modificando éste el flujo vertical de partículas cargadas de alta energía tales como los muones en sitios cercanos al evento (Fig 2b).

Hay evidencias experimentales que demuestran que existen variaciones en la actividad electromagnética antes de la ocurrencia de un sismo, sin embargo no hay ningún consenso y la correlación no es obvia [11,13,15]. Las razones por las que estos métodos fallan son entre otras, porque miden las variaciones del campo geomagnético, en forma local, con sondas puntuales (magnetómetros), no se han medido los efectos globales del campo geomagnético sobre áreas extensas, las razones son: carencia de instrumentación en cuanto a que no existen espectrómetros con capacidad para medir sobre grandes áreas y la segunda, mucho más importante y en cierto modo desafiante: ¿medir qué?.

Muones verticales como sondas geomagnéticas

El uso de la componente vertical del flujo de muones de alta energía generados por la radiación cósmica, puede representar una salida viable al problema de medir las pequeñas fluctuaciones locales del campo geomagnético en grandes extensiones (~40 km de radio). Las partículas cargadas muy masivas tales como los muones que se forman a gran altura (~15 Km) y que sobreviven hasta nivel del mar, son los candidatos potenciales óptimos para ser usados como “sondas geomagnéticas”, dado que las pequeñas variaciones del campo geomagnético, pueden modificar lateralmente su trayectoria, son fácilmente detectables, a través de la Radiación Cherenkov que producen al entrar a un medio como el agua [4–5,16–19].

Una manera indirecta de medir las variaciones del stress mecánico (σ) al que están sometidas las rocas durante un episodio sísmico, consistiría en medir las variaciones locales del campo geomagnético, antes, durante y después del evento, midiendo las variaciones del flujo vertical local de partículas cargadas generadas por la radiación cósmica de alta energía que llegan a la superficie de la tierra. Esta propuesta intenta estudiar la correlación entre las variaciones de flujo de radiación cósmica durante un episodio sísmico local, para ser usado como precursor sísmico.

Montaje experimental

La Hechicera:

Un telescopio para muones verticales

El experimento se realiza en la Facultad de Ciencias, sector la Hechicera, Universidad de los Andes, en la ciudad de Mérida, con coordenadas: 8°37'37,5" Latitud Norte y 71°0,9'00,6" Longitud Oeste (fig 3a). El sitio se encuentra rodeado por montañas

de la Sierra de La Culata al norte y de la Sierra Nevada al sur, algunas de las cuales sobrepasan los 4600 m.s.n.m. y que funcionan como un filtro natural para las partículas con incidencia lateral, según puede evidenciarse en el perfil de alturas de la figura (fig 3b), recibiendo entonces mayormente aquellas partículas cuya trayectoria forma un ángulo bajo con respecto a la vertical del lugar.

Adicionalmente todo el montaje experimental se encuentra en la zona de fallas de Boconó adyacente a varias fallas secundarias, como la falla de La Hechicera, falla de Jají y la falla Albarregas. Fallas de actividad sísmica moderada, aspecto importante, si se intenta utilizar la medición del flujo de partículas cargadas como un posible precursor sísmico, permitiendo establecer una línea base del flujo durante las calmas sísmicas al generar eventos en un número suficiente como para obtener una estadística aceptable a mediano plazo.

Adicional a la posición geográfica, el edificio de la Facultad de Ciencias (Fig 4a) está soportado sobre columnas de acero y concreto armado, “huecas en su centro”, de aproximadamente 22 metros de altura y con paredes de 40 cm de espesor (Fig 4b). Esto constituye un montaje sin precedentes para un experimento de esta naturaleza. Si se sitúa un detector de partículas de radiación cósmica, dentro de una de las columnas y cerca de su base, el montaje así constituido funge como un “Telescopio para Captura de Muones Verticales”, o de chubascos de partículas secundarias (electrones y positrones (e^-/e^+) generadas por los muones al colisionar con la estructura de concreto del edificio), que terminan llegando al fondo de la columna, donde está situado el detector. La eliminación de la componente sistemática de radiación solar y partículas de baja energía ($< 1\text{GeV}$) se obtiene colocando una tapa de hierro de 10 cm de espesor en la parte superior de la columna (Fig 4b).



Fig 3a. Localización geográfica del experimento

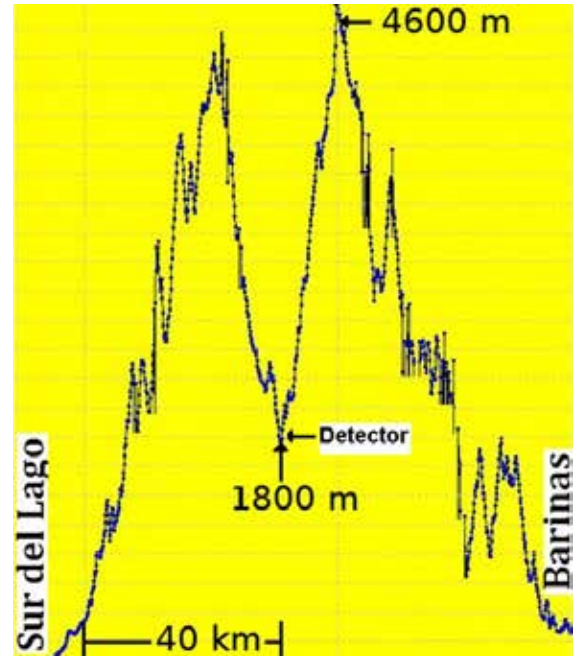


Fig 3b. Perfil de alturas y localización del detector



Fig 4a. Facultad de Ciencias Universidad de los Andes Mérida–Venezuela



Fig 4b. Interior de la columna, detector y filtro de hierro para bajas energías

Sistema de detección

La figura 5a ilustra un esquema del montaje experimental realizado para medir solamente el flujo vertical de partículas y/o de chubascos secundarios generados por éstas. El detector Cherenkov (C) ha sido localizado a 22 metros de profundidad dentro de la columna. Los eventos son registrados por una electrónica de adquisición de datos para luego ser analizados y visualizados tal como se muestra en la figura 5b, en la que se observan dos histogramas de conteo de eventos realizados a 0 y 22 metros (línea azul y roja respectivamente) de profundidad. Se observa en el histograma de los 22 mts la aparición clara de una componente de partículas verticales y/o chubascos generados por éstas, correspondientes a muones verticales. La medición progresiva de histogramas de este tipo se realizó durante un periodo de 4 años consecutivos, estos datos son procesados adecuadamente separando sólo la componente de muones verticales. [20]

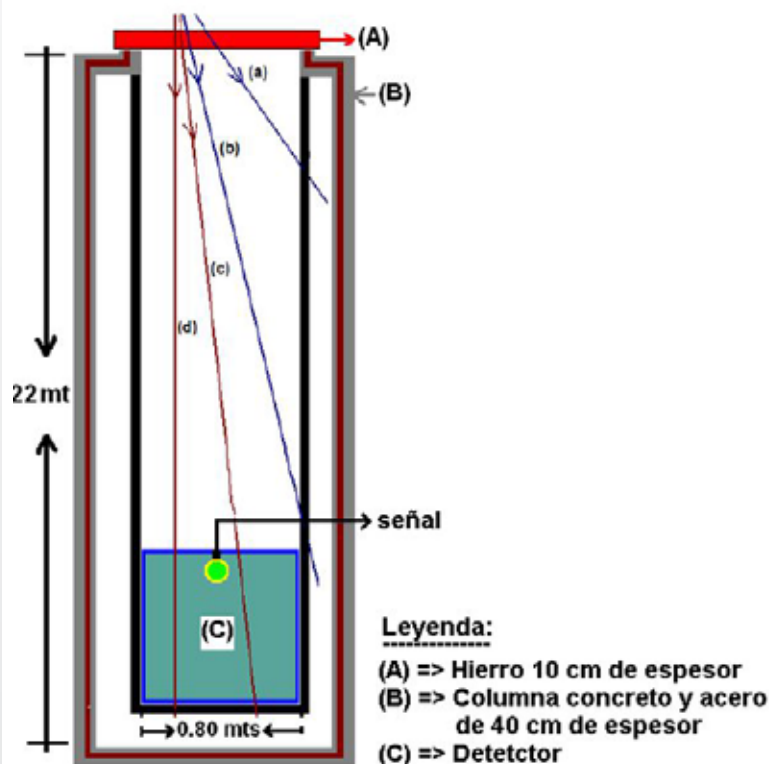


Fig 5a. Esquema de montaje del detector dentro de la columna



Fig 5b. Histogramas a 0 y 22 metros de profundidad.

Correlación de la sismicidad versus flujo

Primeros resultados

La figura 6 (a) ilustra el record de conteo de flujo de muones verticales que comprende una ventana de 80 días consecutivos de registro. Durante esta ventana de tiempo ocurrió una tormenta sísmica con eventos localizados todos en la zona de Caja Seca, Zona Pa-namericana del estado Mérida. El evento sísmico de magnitud 4.2 ocurrió el 01 de Febrero del 2010 a las 11:06:27(HLV), a unos 35 Km al norte de Mérida. Como puede observarse en la figura, el flujo de muones verticales se vio incrementado en ~ 0.5 partículas/ m^2 /seg aproximadamente unos 15 días antes del evento

principal. Se ilustra también en esta figura una línea base estable del detector lo que confirma su estado normal de funcionamiento.

En la figura 6 (b) se ilustra el conteo de flujo de partículas en una ventana de 80 días consecutivos, durante este tiempo se registró un evento sísmico de magnitud 4.0 en la localidad de Jají, el día 28 de Nov a las 10:26:02 (HLV) y a unos 28 Km de Mérida. El flujo de muones registró una disminución anómala, caracterizada por intermitencias de ~ 0.5 partículas/ m^2 /seg iniciándose unos 20 días antes de la ocurrencia del evento y atenuándose después en forma gradual.

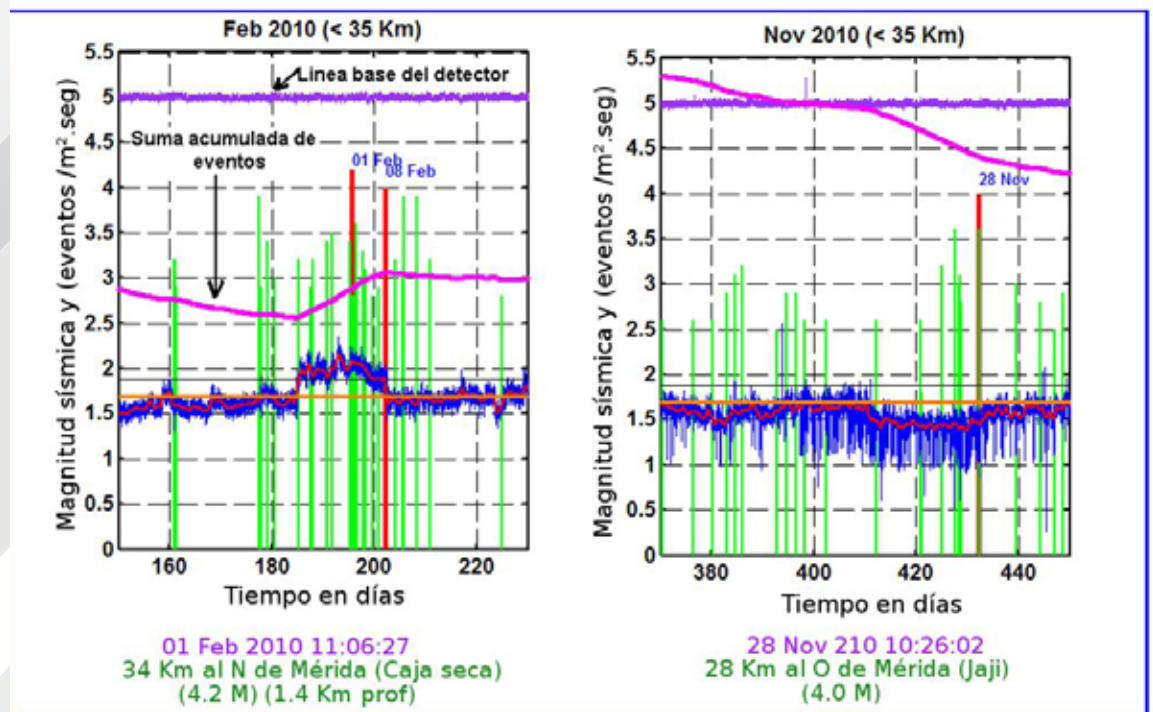


Fig 6a. Flujo de muones: antes, durante y después de dos eventos sísmicos (la línea azul representa el flujo de muones, naranja la línea media, la línea base está representada en morado, la suma acumulada de eventos en magenta, las líneas verticales verdes son los sismos y las líneas verticales rojas representan los sismos mayores a 4)

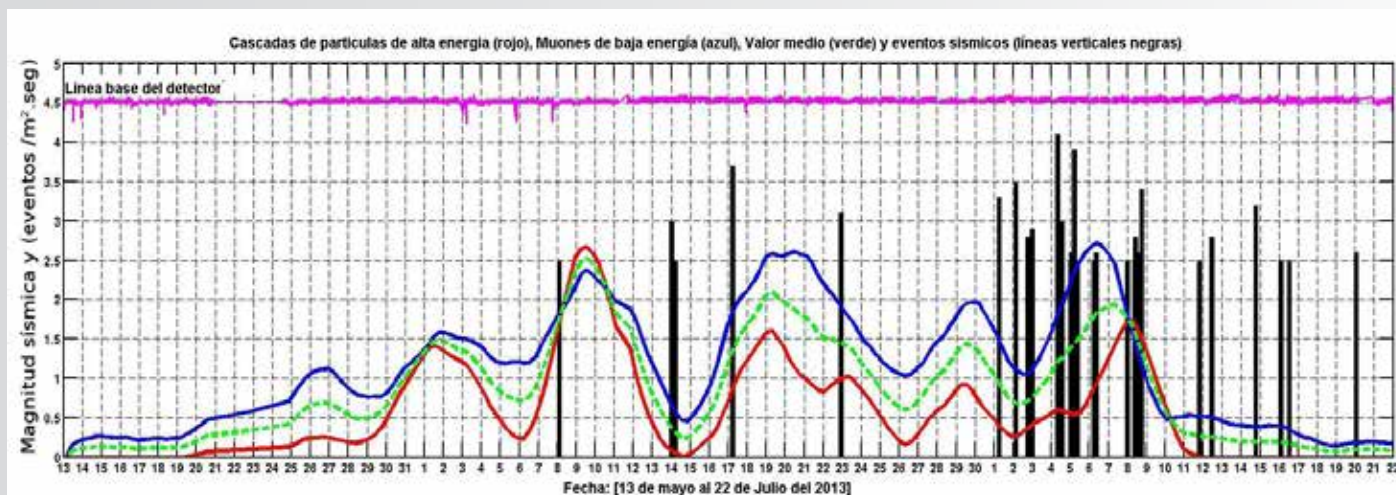


Fig 7. Flujo de radiación cósmica durante la tormenta sísmica de Mucurubá Edo Mérida ocurrida en Junio–Julio del 2013.

La figura 7 ilustra el conteo de partículas durante la tormenta sísmica de Mucurubá, a unos 28 Km de la ciudad de Mérida, en los meses de Junio y Julio del 2013. Esta eventualidad marcó un hecho importante en este experimento, dado que se pudo demostrar que las componentes de cascadas generadas por muones de alta energía y muones individuales están claramente correlacionadas, como puede observarse en la línea azul correspondiente a cascadas de partículas y la línea roja correspondiente a muones. Puede observarse un aumento progresivo del flujo unos 20 días antes del centro de la tormenta sísmica de 2 partículas/ m^2 /seg y que luego se disuelve hasta normalizarse a partir del día 21 de julio.

¡Alerta temprana! Una reflexión a tiempo

Esta es una de las formas de acción que podría arrojar resultados a corto plazo en la Gestión del Riesgo de Desastres Socio Naturales en la región de Venezuela y Latinoamérica. Sin embargo, los desastres sufridos en diferentes países de la región en los últimos años (incluyendo Chile), y en otros países del mundo (Incluyendo USA y Japón), demuestran que no existen hasta la fecha sistemas de alerta temprana (SAT) eficientes. Por un lado los protocolos de activación de los SAT suelen ser muy lentos porque requieren de la aprobación de varios organismos e instituciones de cada estado. Por otro lado, no son completos, ya que, en la mayoría de los casos, no han logrado implementar todas las fases de su diseño y no logran incluir a las personas, poblaciones e instituciones que deben responder en el momento de la alerta.

Aunque el esquema de funcionamiento de un SAT parece muy sencillo, la realidad es diferente, como se mencionó en los primeros párrafos, hasta el presente se ha logrado un desarrollo aceptable de la primera fase (estudio y mapeo de amenazas naturales); la segunda fase, a la que apunta este trabajo, es muy compleja y requiere de una gran inversión de recursos humanos y financieros. Luego se llega al nodo crítico: ¿Que significa la frase?, DAR LA ALERTA. Para responder a esto se debe pasar del plano científico, al político y comunitario, se debe activar un esquema de acciones que involucren a Autoridades, Instituciones y Comunidades Organizadas, así como a accionar de manera coordinada para prevenir o mitigar los efectos del fenómeno peligroso (amenaza natural) impulsando la respuesta específica de la población y sus instituciones. El objetivo de los SAT es facultar a los individuos y a las comunidades amenazadas para tener la posibilidad de actuar a tiempo y de forma apropiada: ESTE OBJETIVO NO SE HA LOGRADO. Esta propuesta de trabajo está orientada a proponer un esquema de observación, monitoreo automático y detección de indicadores (precursores SAT) que sirvan como elementos de decisión para activar este esquema de acciones. Es decir, la propuesta está orientada a disponer de información confiable y accesible, que permita tomar la decisión crítica de DAR LA ALERTA y poner en funcionamiento la fase de toma de acciones por parte de Autoridades, Instituciones y Comunidades Organizadas.

*** Autores:**

Misael D. Rosales. (Gestor y responsable del proyecto)

Docente, Investigador del Grupo de Física Aplicada. Email: misael@ula.ve

Jaime R. Lafaille, Martín A. Rengifo, Carlos E. Guada.

Docentes, Investigadores del Laboratorio de Geofísica

Luis A. Núñez, Alejandra L. Melfo. Docentes, Investigadores del Grupo de Física Fundamental

Juan C. Villegas, Arturo J. Espinoza. Tesis egresados en este proyecto, Dpto. de Física, Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Agradecimientos: (a) Esta investigación ha sido posible gracias al financiamiento del CDCHTA a través del proyecto No.: C-1598-08-05-A. (b) A la comunidad internacional del proyecto LAGO por permitirnos el uso del fotomultiplicador, el software y la electrónica de adquisición.

Fotos y diagramas: Cortesía de los autores del artículo.

Referencias

- [1] http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_del_océano_índico_de_2004
- [2] Terremoto de Japón 2011, http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_y_tsunami_de_Japón_de_2011
- [3] Density Muon Radiography of La Soufriere of Guadeloupe Volcano: Comparison with Geological, Electrical Resistivity and Gravity data. Nolwenn Lesparre y otros. Institut de Physique du Globe de Paris Sorbonne Paris Cite, Paris, France, Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Lyon, France, Geosciences, Rennes, France e Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France y Systems and Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada.
- [4] Allkofer O C, Introduction to cosmic radiation, Munchen: K. Thiemig, (1975).
- [5] Peter K.F. Grieder, Cosmic Rays At Earth (Researcher's Reference Manual and Data Book), Elsevier Science, B.V, San Francisco 2001
- [6] Kanetada Nagamine, Introductory Muon science, Cambridge, 2003.
- [7] R. Suárez – Ántola, “The Region of Influence of Significant Defects and the Mechanical Vibrations of Linear Elastic Solids”, Proceedings of the XI DINAME (Ed. D. A. Rade and V. Steffen Jr), Febrero– Marzo de 2005.
- [8] Quake Finder, http://www.quake_nder.com/, USA
- [9] Moshe Merzer and Simon L. Klemperer Modeling Low–frequency magnetic–_eld precursors to the loma prieta earthquake a precursory increase in fault–zone conductivity , Birkhauser verlag, Basel, 1997
- [10] A.C. Fraser–Smith, A. Bernardi, P.R. McGill, M. E. Ladd, R.A. Helliwell and O.G. Villardjr Low–frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, Stanford, 1990
- [11] Herraiz M., Farello A., Cueto M. and Mohino E. (2000) Una aproximación crítica a la propuesta de fenómenos ionosféricos como precursores sísmicos. In Herraiz M. and de la Morena B. (eds.) Tendencias Actuales en la Investigación de la Ionosfera. Física de la Tierra 2000, V–12, 319–335, Universidad Complutense Madrid.
- [12] Z. Kobylnski, S. Michnowski, Atmospheric Electric and Electromagnetic Field Rapid Changes as Possible Precursors of Earthquakes and Volcano Eruption: a Brief Review, Polonia, 2007.
- [13] Earthquake prediction, http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_prediction.
- [14] Jeremy Davis, Mathematical Modeling of Earth's Magnetic Field, Virginia Tech, Blacksburg, 2004
- [15] Michel Parrot, Electromagnetic Disturbances Associated With Earthquakes: An Analysis of Ground–Based and Satellite Data, USA, 1990.
- [16] Juan Carlos Villegas Brito. Influencia de anomalías geomagnéticas locales en la variación del flujo de muones generados en la atmósfera por radiación cósmica. [Una propuesta para el estudio de precursores sísmicos.] (Tesis de Licenciatura), ULA, Facultad de Ciencias, Departamento de Física 2012, Tutor: Prof. Misael Rosales
- [17] Carlos Quintero. Calibración de los Detectores Prototipos del Proyecto L.A.G.O. (Venezuela) (Tesis de Licenciatura), ULA, Facultad de Ciencias, Departamento de Física 2011, Tutor: Prof. Misael Rosales.
- [18] Mauricio Suárez Durán. Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 m.s.n.m. Universidad Industrial de Santander, Escuela básica de Física, Bucaramanga Colombia, 2011, Tutor: Prof. Misael Rosales.
- [19] Arturo J. Espinoza Díaz. Medición de la componente vertical del flujo de partículas cargadas, procedentes de la radiación cósmica de alta energía, en la Hechicera–Mérida. [1893msn–800g/cm²], (Tesis de Licenciatura), ULA, Facultad de Ciencias, Dpto. de Física 2012, Tutor: Prof. Misael Rosales
- [20] Misael D. Rosales, For the LAGO Collaboration. The large aperture gamma ray observatory as an observational alternative at high altitude. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, vol. 40, 2011, pp. 135–140, Instituto de Astronomía México.