

EFFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO SOBRE EL CONTEO DE PARTÍCULAS
CARGADAS DETECTADAS POR UN CENTELLADOR EN EL LABORATORIO DE FÍSICA
CÓSMICA DE CHACALTAYA

THE EFFECT OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD ON THE COUNTING OF CHARGED
PARTICLES DETECTED BY A SCINTILLATOR IN THE LABORATORY OF COSMIC RAY PHYSICS AT
MOUNT CHACALTAYA (BOLIVIA)

WINKELMANN R.

Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
La Paz–Bolivia

(Recibido el 30 de julio de 2010; aceptado el 15 de agosto de 2010)

RESUMEN

Las partículas secundarias que son producidas por rayos cósmicos primarios se ven afectadas por diversos factores en la atmósfera, como presión, temperatura, y otros. El Campo Eléctrico Atmosférico (CEA) es uno de estos factores. Se observa que durante tormentas eléctricas la tasa de conteo de las partículas puede incrementarse considerablemente. En el presente trabajo se busca observar en el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya (5220 msnm) la relación existente entre el CEA y las partículas secundarias producidas por rayos cósmicos primarios, bajo dos distintas condiciones climáticas: buen tiempo meteorológico y tiempo meteorológico perturbado.

Descriptores: campo eléctrico atmosférico — rayos cósmicos.

Código(s) PACS: 92.60.Pw, 95.50.S, 95.45.i

ABSTRACT

Secondary particles produced by primary cosmic rays are affected by diverse atmospheric factors such as pressure and temperature. The Atmospheric Electric Field is one such factor. There is evidence that during electric storms the counting rate of particles can increase considerably. In this work we look at the relationship between the Atmospheric Electric Field and the secondary particles, at the Chacaltaya Cosmic Ray Physics Laboratory, under two distinct weather conditions: good and unsettled weather.

Subject headings: atmospheric electric field — cosmic rays

1. INTRODUCCIÓN

El conjunto de partículas generadas por un rayo cósmico primario posee tres componentes: hadrónica, electromagnética y muónica; éste conjunto de partículas se ven inmersas en una serie de condiciones atmosféricas, como modulación de campo eléctrico (Feynman et al. 2000), presión y temperatura (Alvarez 2008) entre otros, presentes desde el momento de su formación, pero no todas las partículas se verán afectadas de la misma forma.

La idea de una posible influencia del Campo Eléctrico Atmosférico (CEA) durante tormentas eléctricas sobre partículas cargadas, en principio electrones, fue planteada por primera vez en la década de los 20 (Wilson 1925); durante las siguientes décadas varios fueron los intentos por observar una aceleración en partículas cargadas antes y/o durante tormentas eléctricas, los resultados de dichas observaciones fueron contradictorios y nada claros. En 1985 Alexeenko et al. realiza la primera ins-

pección minuciosa entre medidas del CEA y variaciones en el registro de rayos cósmicos encontrando correlaciones de corta duración (alrededor de 8 a 16 minutos) con un incremento en la tasa de conteo en el registro de rayos cósmicos de 0.2 a 0.3%; trabajos posteriores como el de Aglietta et al. (1999), Brunetti et al. (2000) y Vernetto et al. (2001), entre muchos otros, demostraron que el CEA afecta tanto a muones como electrones de carga positiva y negativa, además de mostrar un incremento en la radiación X y γ . Vernetto reporta un incremento en la tasa de conteo de un Chubasco Atmosférico Extenso (EAS por sus siglas en inglés) de 10 a 15% en un periodo de 10 a 20 minutos además, Alexeenko et al. (1985) reportan incrementos en la tasa de conteo de hasta un 20% antes de una descarga eléctrica.

La generación del CEA se debe a la diferencia de potencial existente entre la Tierra y la Electrósfera, otras influencias atmosféricas como las nubes cargadas eléctricamente son capaces de producir inten-

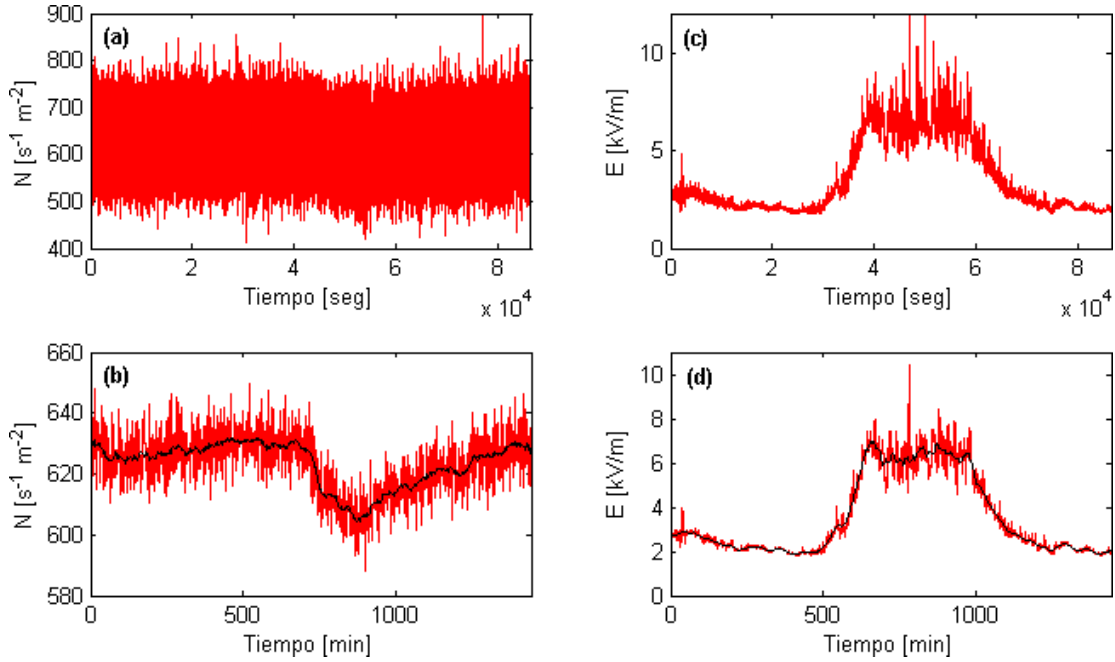


FIG. 1.— Datos correspondientes al 06 de Octubre. (a) Registro al segundo de un día para el centellador. (b) Registro al segundo de un día para el CEA. (c) Registro del centellador promediado al minuto, la curva negra corresponde a los datos alisados. (d) Registro del CEA promediado al minuto, la curva negra corresponde a los datos alisados.

Los campos eléctricos. El modelo clásico de la distribución de cargas en las nubes establece que ésta puede llegar a tener hasta tres centros de carga: uno ubicado en la cima de la nube, con una carga de $+40 \text{ coulombs}$, alrededor de los 10 a 12 Km desde la superficie terrestre, una segunda concentración de carga, con -40 coulombs , ubicada alrededor de los 5 a 7 Km , también medida desde la superficie, y una tercera carga no tan significativa que puede o no estar presente, con $+3 \text{ coulombs}$, ubicada en la base de la nube alrededor de los 2 Km , éstos valores solo son referenciales, ya que dependerán del tipo de nube, su desarrollo, topología del terreno, etc.

Las partículas que se ven inmersas en un CEA son aceleradas bajo el mecanismo *Electrón Fugitivo* (*Runaway Breakdown*) propuesto por Gurevich et al. (1999), el cual establece que las partículas que son aceleradas dentro del campo eléctrico atmosférico experimentan un incremento en su energía y pueden llegar a producir nuevas partículas mediante interacciones con núcleos de la atmósfera, a su vez éstas producen nuevas partículas por el mismo mecanismo hasta que las últimas partículas no tengan la energía suficiente para continuar con el proceso, de manera que el número de partículas aumenta de forma exponencial.

El presente trabajo está destinado a realizar un estudio de la influencia del CEA en el conteo de partículas generadas a partir de rayos cósmicos detectados en el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya (ubicado a 5230 m.s.n.m.) por un centellador, durante dos diferentes escenarios climáticos: días con buen tiempo meteorológico y días con tiempo meteorológico perturbado por nubes, en un período de tres meses.

2. DETECTORES DE PARTÍCULAS EN CHACALTAYA

Existen diversos arreglos experimentales instalados en el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya destinados a detectar partículas secundarias, las cuales, al igual que en cualquier parte del mundo, son afectadas por factores atmosféricos. Los registros de partículas cargadas son constantemente corregidos por presión y temperatura, ya que se cuenta con instrumentos para realizar éstas medidas. Variaciones en el conteo de partículas durante tormentas eléctricas son observadas constantemente, algunas de ellas son reportadas en Huaygua et al. (2002), encontrando un número estadísticamente significativo de tales eventos mediante correlaciones con equipos improvisados para detectar descargas eléctricas atmosféricas; no es sino hasta Septiembre del año 2008 que el Laboratorio empieza a registrar medidas del CEA con un instrumento específico para éste propósito, es así que por primera vez, en éste trabajo, se realiza un estudio de las variaciones en el registro de partículas acompañadas por medidas del CEA.

3. OBTENCIÓN Y METODOLOGÍA DE DATOS

En el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya se encuentran instalados los equipos utilizados en éste trabajo. El primero, un sensor de campo eléctrico atmosférico de la marca *Boltek*, modelo *EFM-100* con un tiempo de respuesta de 0.1 segundos, un rango de resolución digital de 0.01 kV/m , y un rango de medición desde -20 kV/m hasta $+20 \text{ kV/m}$, si los valores medidos superan éstos límites el sensor se satura; para evitar saturaciones es posible disminuir la sensibilidad del *EFM-100* a través de resistencias con valores adecuados. Debido al intenso campo eléctrico registrado durante las pruebas preliminares a la instalación del *EFM-100*, se opta por reducir

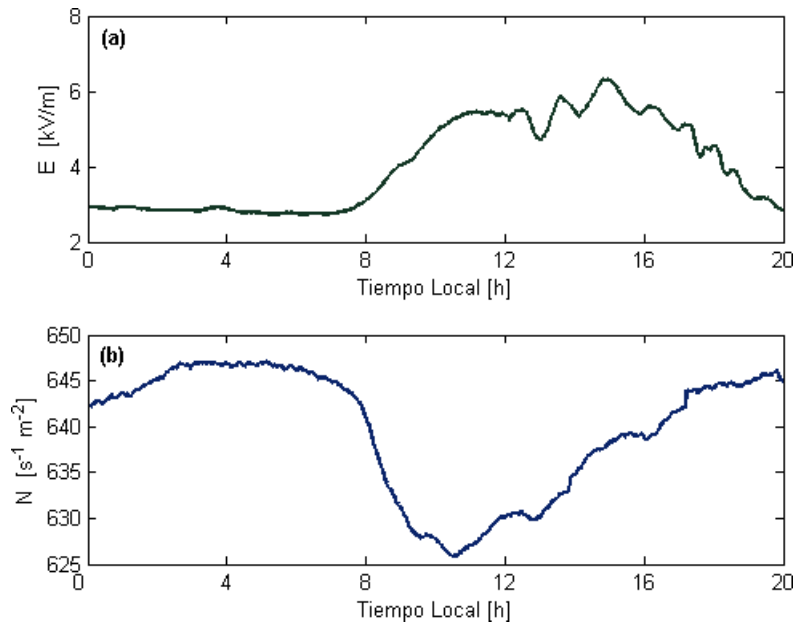


FIG. 2.— Modulaciones promedio. (a) Campo eléctrico atmosférico. (b) Cuentas de partículas.

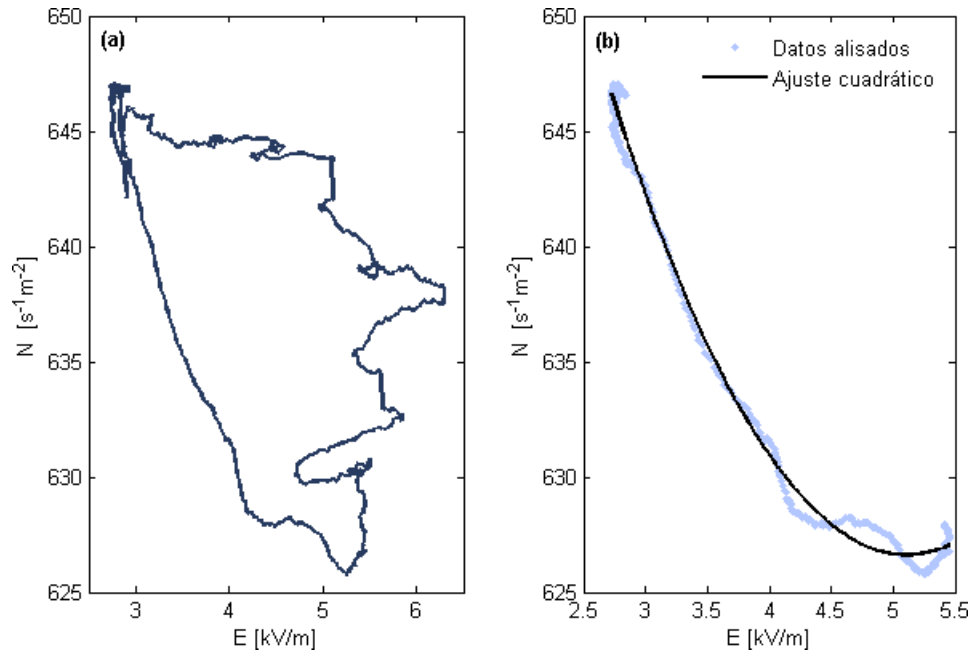


FIG. 3.— (a) Correlación promedio con los datos de las curvas alisadas. (b) Ajuste cuadrático en la región de descenso del número de partículas.

la sensibilidad del mismo a un 25% del valor original.

El segundo es un detector de partículas compuesto por un centellador de plástico de 0.25 m^2 de área y 0.1 m de espesor. Como se sabe, los centelladores sólo detectan partículas cargadas, fundamentalmente electrones y muones, por lo tanto resulta muy adecuado para nuestro propósito.

3.1. Selección de datos

Los datos utilizados para éste trabajo son los registrados durante los meses de Septiembre a Noviembre de 2008; se seleccionan y separan primero los registros diarios del CEA que presenten una modulación

suave y de baja intensidad, luego se escogen días en los cuales la intensidad del CEA muestre alteraciones bruscas y saturaciones en el equipo. El primer caso es denominado "días con buen tiempo meteorológico", ya que presentan un cielo con poco o nada de nubosidad, esto se corrobora con imágenes satelitales obtenidas en NASA (2010). El segundo grupo es llamado "días con tiempo meteorológico perturbado" por tratarse de días con alteraciones eléctricas en la atmósfera debidas a la presencia de nubes cargadas eléctricamente, precipitaciones, rayos y otros, así, el primer grupo suma un total de 14 casos, en cambio, el segundo tiene 24 casos.

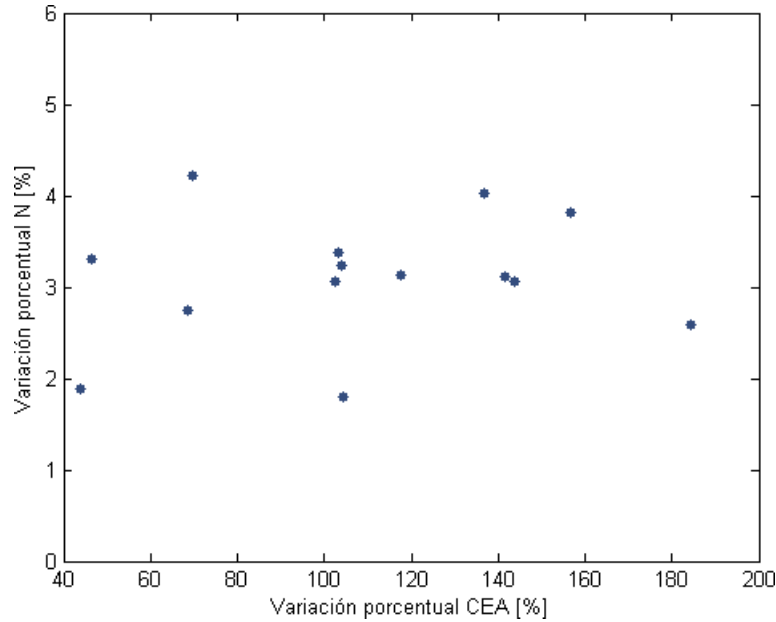


FIG. 4.— Variación porcentual en el registro del centellador vs. variación porcentual del CEA. Cada punto representa un día.

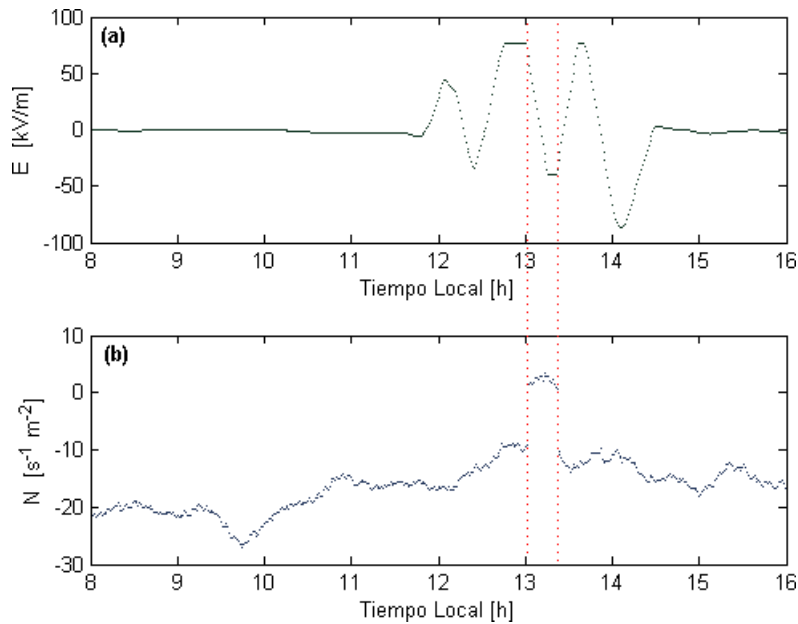


FIG. 5.— Incremento en el número de partículas registrado el 07 de Octubre de 2008. Las líneas verticales muestran la coincidencia temporal entre ambos registros: CEA (a) y N (b).

3.2. Metodología

3.2.1. Días con buen tiempo meteorológico

Los datos obtenidos por ambos detectores son registrados al segundo, lo que hace un total de 86400 valores al día para cada detector. La Fig. 1 (a) y (c) muestran dicho registro para el centellador y el CEA respectivamente (los datos corresponden al 06 de Octubre). En el caso del centellador (Fig. 1(a)) puede apreciarse tan sólo una franja, sin una modulación, sin embargo, si se toma el promedio de los valores sobre un minuto reducimos el número de registros a 1440 y posteriormente se realiza un alisado de la curva a través de una media móvil, aparece clara-

mente una modulación. La Fig. 1(b) muestra el resultado de dicho proceso, donde la curva negra es el alisado del registro promediado. Un proceso idéntico se lleva a cabo para el caso del CEA, la Fig. 1(d) muestra el resultado para este caso.

Una vez que se obtienen las curvas alisadas de ambos registros para los 14 casos se realiza una gráfica promedio de ambas modulaciones (Fig. 2). Se ve que ambas modulaciones tienen inicio a la misma hora aproximadamente, entre las 7 y 8 de la mañana hora local.

A continuación se realiza una correlación entre ambas modulaciones (Fig. 2), la Fig. 3(a) muestra el resultado, donde es posible distinguir el ciclo de-

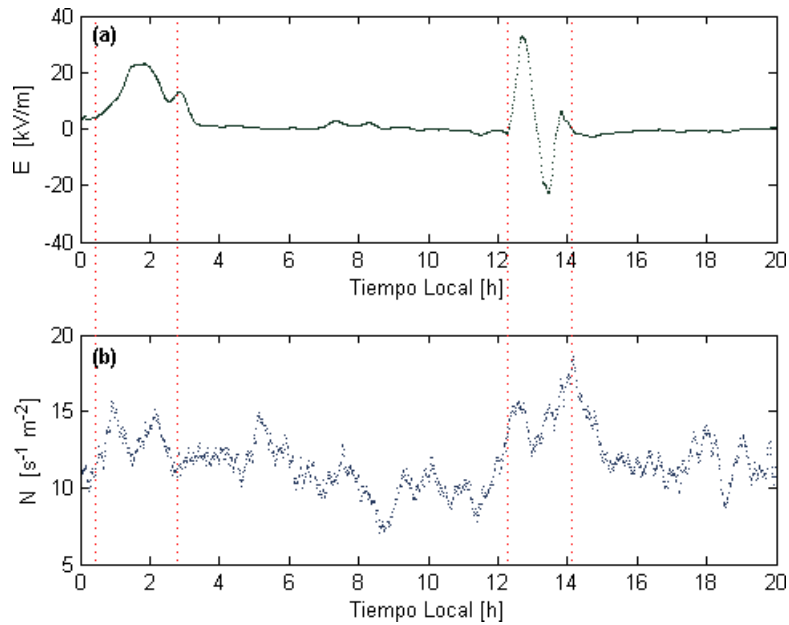


FIG. 6.— Dos incrementos notables en el registro de partículas coincidentes con alteraciones en el CEA registrados el 13 de Octubre de 2008. Las líneas verticales muestran la coincidencia temporal entre ambos registros: CEA (a) y N (b).

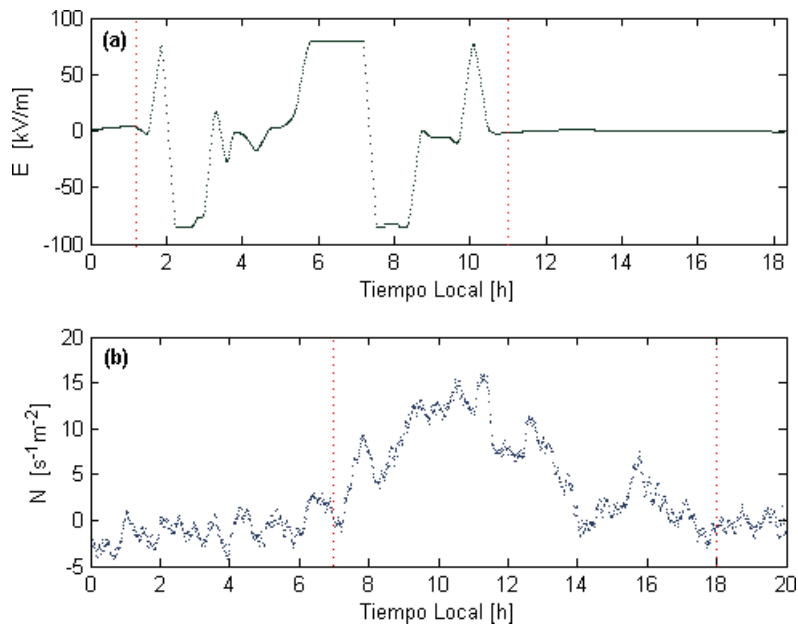


FIG. 7.— Variaciones notables en el registro de partículas no coincidentes temporalmente con alteraciones en el CEA registrados el 10 de Noviembre de 2008. El desfase es de aproximadamente de siete horas. Las líneas verticales muestran el tiempo aproximado de duración de las perturbaciones en cada registro: CEA (a) y N (b).

bido a que ambas modulaciones son opuestas, mientras una se incrementa, la otra disminuye y viceversa. En la etapa en que los valores del registro del centellador disminuyen, es posible realizar un ajuste cuadrático (Fig. 3(b)) con un coeficiente de correlación de 0.99, esta correlación entre ambos registros se mantiene por el lapso de 7 horas aproximadamente.

3.2.2. Días con tiempo meteorológico perturbado

Primero realizamos un análisis similar al caso anterior, reducimos el número de datos al minuto, luego

se restan las modulaciones diarias obtenidas para el caso de días con buen tiempo meteorológico para así obtener ambos registros libres de las modulaciones. Se encuentran tres casos en los que destacan incrementos de larga duración en el registro de partículas acompañado de intensos y bruscos cambios en la intensidad del CEA, sin embargo, el procedimiento descrito anteriormente hace imperceptibles las variaciones de corta duración en ambos registros, sobre todo en el de partículas, por lo que para detectar éstas pequeñas variaciones se trabaja con los registros to-

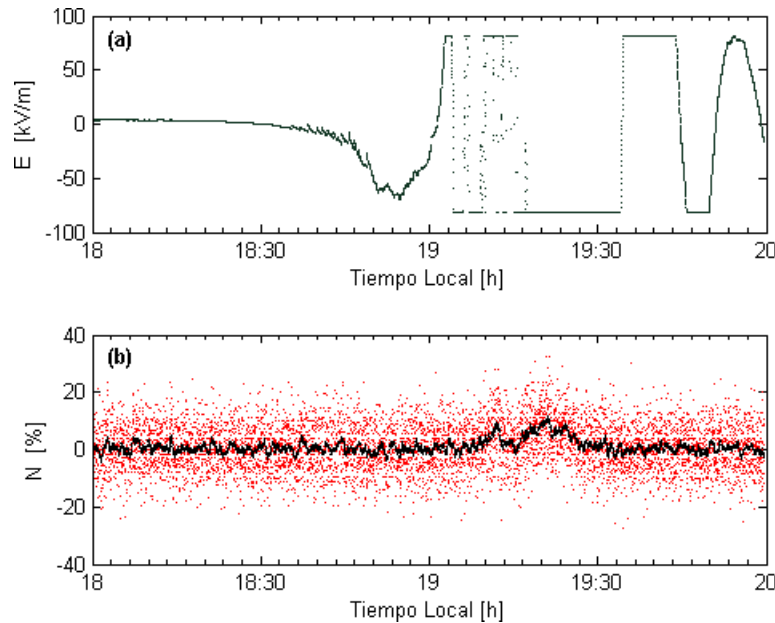


FIG. 8.— Variación de corta duración registrada el 18 de Octubre de 2008. (a) Intensas variaciones en el registro del CEA. (b) Registro de partículas con dos variaciones de corta duración.

mados al segundo. Para encontrar éstas variaciones de corta duración se analizan las variaciones porcentuales en el registro de partículas que coincidan temporalmente con saturaciones prolongadas o súbitos cambios en la intensidad del CEA. Analizar las variaciones porcentuales no basta para poder identificar éstos incrementos de corta duración, por lo que se realizó una media móvil al registro de partículas, esto ayuda a minimizar las fluctuaciones, poniendo en evidencia los incrementos de corta duración. Las gráficas correspondientes a éstos análisis se muestran en la siguiente sección.

4. RESULTADOS

4.1. Días con buen tiempo meteorológico

Para verificar una variación en el número de cuentas de las partículas se restan las modulaciones diarias de ambos registros, una vez hecho esto es posible analizar las variaciones porcentuales máximas. La Fig. 4 muestra el resultado de dicho tratamiento, además, pone en evidencia la independencia de ambas modulaciones, es decir, no importa cuanto pueda crecer el CEA, como puede verse hasta casi un 200% respecto al mínimo diario, las partículas no sienten un incremento considerable, siempre están entre 2 y 5% aproximadamente. Lo que podría explicarse porque la intensidad del CEA en días con buen tiempo meteorológico no es lo suficientemente grande como para iniciar el proceso del *Electrón Fugitivo*.

4.2. Días con tiempo meteorológico perturbado

Como resultado del análisis de variaciones de larga duración con tiempo meteorológico perturbado se obtuvieron 3 casos. El primero de ellos (Fig. 5) muestra un salto desde valores negativos hasta valores positivos respecto a la media en el registro de partículas que coincide con un descenso en el valor del CEA desde valores mayores a los 80 kV/m hasta

un mínimo de 40 kV/m aproximadamente, con una duración cerca de 30 minutos empezando alrededor de las 13 horas.

El siguiente caso (Fig. 6) muestra dos notables variaciones del CEA que coinciden también con dos incrementos en el registro de partículas. La primera variación que alcanza un poco más de 20 kV/m con una duración de 3 horas aproximadamente que coincide con dos pequeños picos en el registro de partículas, pero que no se ajustan del todo, temporalmente hablando, a los picos del CEA. La segunda variación en el CEA alcanza los 33 kV/m, dura alrededor de 2 horas y también coincide con incrementos en el registro de partículas. Cabe destacar que el registro del CEA no sufre saturaciones, es decir, no llega al máximo valor del sensor que es de 80 kV/m, y aún así existe incrementos notables en el registro de partículas.

El registro realizado el 11 de Noviembre de 2008 (Fig. 7) muestra un CEA sumamente perturbado, desde variaciones de corta duración, presumiblemente causadas por descargas eléctricas, hasta saturaciones prolongadas, siendo la más larga cerca de 2 horas. A diferencia de los dos casos anteriores, la variación en el registro de partículas no es coincidente en tiempo, sino que después de varias horas de haber ocurrido las alteraciones en el CEA las partículas empiezan a sentir este efecto, y les toma alrededor de una hora más regresar al número de partículas promedio, es decir que la perturbación del CEA dura cerca de 10 horas, en cambio el incremento en el número de partículas dura aproximadamente 11 horas.

A continuación se muestran los casos con variaciones de corta duración, en los cuales la media móvil, que es la línea oscura y con poca variación colocada sobre el registro de partículas, ayuda a identificar los incrementos reales en el registro de partículas. El

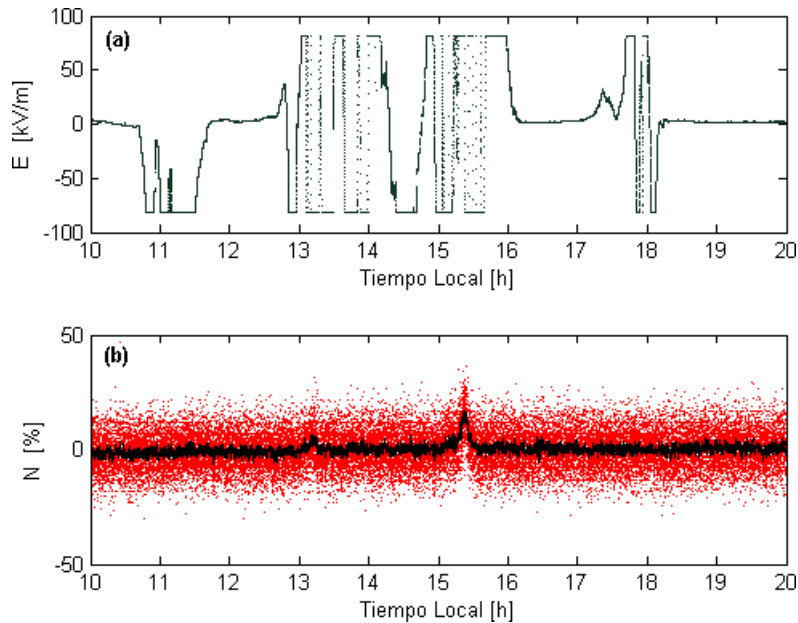


FIG. 9.— Variación de corta duración registrada el 13 de Noviembre de 2008. (a) Intensas variaciones en el registro del CEA. (b) Registro de partículas con dos variaciones de corta duración.

primero de éstos casos es el registro tomado el día 18 de Octubre de 2008 (Fig. 8), en el cual podemos destacar las intensas variaciones y saturaciones prolongadas en el registro del CEA (Fig. 8(a)), al mismo tiempo encontramos dos incrementos en el registro de partículas (Fig. 8(b)), el primero con una duración de 5 minutos aproximadamente y un incremento del 28.9 %, y el segundo, con una duración de alrededor de 15 minutos y un incremento del 33.4 %.

El segundo caso fue registrado el 13 de Noviembre de 2008 (Fig. 9). En el panel superior podemos ver saturaciones en el registro que cambian rápidamente de signo, claro ejemplo de descargas eléctricas, existen tres secciones que podemos identificar con claridad, la primera que ocurre alrededor de las 11 horas, una segunda que ocurre entre las 13 y 16 horas aproximadamente, y la tercera alrededor de las 18 horas. En cambio, en el panel inferior, que es el registro de partículas, podemos observar tan sólo dos alteraciones que corresponden temporalmente a la segunda variación del CEA entre las 13 y 16 horas, el primero de ellos logra una variación del 31.2 % y dura aproximadamente 10 minutos, el segundo, un poco más intenso y duradero, logra un incremento del 36.1 % por un tiempo no menor a los 20 minutos.

Finalmente, el registro realizado el 19 de Noviembre de 2008 muestra un caso similar al anterior, en el registro del CEA tenemos dos regiones con cambios súbitos, el primero entre las 10 y 13 horas, y el segundo, menos intenso, entre las 16 y 17 horas, mientras que el registro de partículas (Fig. 10(b)) muestra solo una variación entre las 16 y 17 horas, en otras palabras, ésta variación coincide con la variación del CEA menos intensa. La variación en el registro de partículas posee un incremento del 29.4 % y dura al rededor de 10 minutos.

5. CONCLUSIONES

Se logra realizar un primer estudio del CEA en el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya encontrando un perfil promedio para días con buen tiempo meteorológico (Fig. 2(a)), encontrando su valor máximo cerca a las 15 horas en tiempo local, que es un resultado coincidente con el expuesto en Feynman et al. (2000), el cual establece que sin importar la ubicación geográfica la máxima variación del potencial atmosférico en días con buen tiempo meteorológico ocurre a las 19 horas del meridiano de Greenwich, además, Chacaltaya es un lugar bastante particular en este sentido, ya que el mínimo valor para días con buen tiempo meteorológico es del orden de 3 kV/m, a diferencia de los 0.1 kV/m mostrados en Ramachandran et al. (2007) y Feynman et al. (2000). Esta característica es debida principalmente a dos peculiaridades que posee el laboratorio: la primera se debe a la altura a la que se encuentra Chacaltaya (5230 m.s.n.m.), además de tratarse de una montaña, y la segunda se debe a la particular ubicación del sensor *EFM-100*, ya que éste se encuentra en una torre que a su vez se halla sobre depósitos de galena que intensifican el CEA, lo cual pudo comprobarse durante la calibración del sensor.

Por otra parte, el análisis realizado para encontrar alguna correlación entre el CEA y el registro de partículas durante días con buen tiempo meteorológico reveló que ambas modulaciones diarias se originan al mismo tiempo y mantienen una alta correlación por varias horas (en promedio un coeficiente de correlación cuadrático de 0.99 por un lapso de aproximadamente 7 horas). Sin embargo, el resultado final de éste análisis lo muestra la Fig. 4, en el cual se aprecia una completa independencia entre ambas modulaciones.

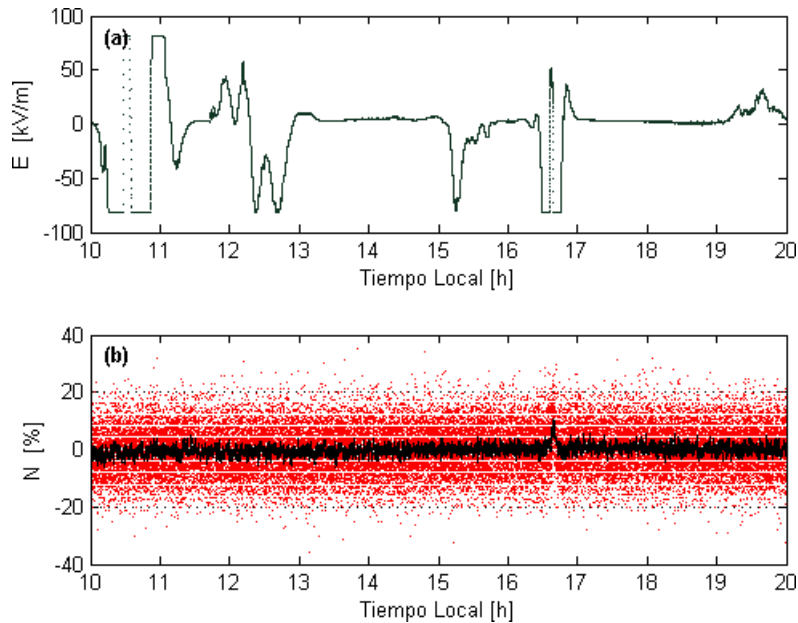


FIG. 10.— Variación de corta duración registrada el 19 de Noviembre de 2008. (a) Variaciones en el registro del CEA con dos regiones muy bien diferenciadas. (b) Registro de partículas con tan solo una variación de corta duración.

Para el caso de días con tiempo meteorológico perturbado se encuentran dos tipos de resultados, variaciones de larga y corta duración, que precisamente concuerdan con los reportados en Aglietta et al. (1999). De 24 casos estudiados, tan solo 4 muestran variaciones de larga duración, siendo éstos poco homogéneos en su comportamiento, es decir, los incrementos en el registro de partículas no siempre ocurren simultáneamente a las perturbaciones en el CEA, como es el caso del registro realizado el 10 de Noviembre de 2008 (Fig. 7), el cual muestra un retraso de varias horas en el incremento del registro de partículas comparado al tiempo de inicio en las perturbaciones en el CEA.

Para el caso de variaciones de corta duración se encontraron registros de 3 días que concuerdan con éste perfil, los cuales revelan un incremento en la razón de conteo de entre 29 y 36% con una duración de 5 a 20 minutos aproximadamente. Al parecer las variaciones de corta duración siempre son coincidentes, temporalmente hablando, con bruscos incrementos y

saturationes en el registro del CEA. Sin embargo, no siempre se presentan cuando el CEA sufre intensas y prolongadas fluctuaciones, claro ejemplo de ello son los registros realizados los días 13 y 19 de Noviembre (Figs. 9 y 10), el registro del CEA muestra marcadas regiones con intensas perturbaciones, pero el incremento en la razón de conteo de las partículas solo es coincidente con algunas de éstas regiones.

En conclusión podemos decir que los incrementos en las razones de conteos durante perturbaciones en el CEA, no son un efecto que siempre se presente, ni siquiera que tengan duraciones o intensidades iguales en todos los casos.

Una razón para que éste fenómeno no sea constante podría radicar en el detector de centelleo, ya que al ser de una superficie pequeña la fluctuación sobre la media es muy grande (de más de 4σ), por lo que las variaciones debidas al CEA podrían estar inmersas dentro de las fluctuaciones, es por esto que un futuro análisis debe usar un arreglo de detectores para el registro de partículas.

REFERENCIAS

- Aglietta, M. et al. 1999, Proc. 26-th ICRC, 7, 351
 Alexeenko, V. V. et al. 1985, Proc. 19-th ICRC, 5, 352
 Alvarez, J. 2008, Efecto de las Tormentas Eléctricas en los Rayos Cósmicos Detectados en la Superficie Terrestre (Tesis de Maestría, UNAM)
 Brunetti, M. et al. 2000, Geophys. Res. Letter, 27, 1599
 Feynman, Leighton, & Sands. 2000, Física Vol II (Addison-Wesley-Longman)
 Gurevich, A. V., Zybin, K. P., & Roussel, R. A. 1999, Dupre Phys.Lett. A, 254, 79
 Huaygua, N., Velarde, A., & Saavedra, O. 2002, Revista Boliviana de Física, 8, 23
 NASA. 2010, <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>
 Ramachandran, V. et al. 2007, The South Pacific Journal of Natural Science, 12, 70
 Vernetto, S. et al. 2001, Proc. 27-th ICRC, 10, 4165
 Wilson, C. T. 1925, Proc. Cambridge Phil. Soc., 22, 534