

RESUMEN

La ocurrencia de Eventos de Protones Solares (SPE por sus siglas en inglés) son considerados fenómenos aleatorios asociados a las fulguraciones solares y fenómenos de ondas de choque; los SPE son de baja energía y no penetran la atmosfera terrestre, su detección es por satélites que se encuentran en el espacio interplanetario. Esporádicamente se presentan Eventos de Protones relativistas Solares (RSP por sus siglas en inglés) con energías mayores a los 500[MeV], también conocidos como Eventos a Nivel del Suelo (GLE por sus siglas en inglés); su detección es por una red de monitores de neutrones con base en tierra (Oulu, Mcurdo, Cheltenham, etc.). El primer evento fue reportado en 1942 registrándose hasta la fecha 70 (último en 2006), los datos de 1942-1960 son muy limitados por el inicio en el desarrollo de los detectores de partículas; actualmente se cuentan con resoluciones por minuto.

El mecanismo que conlleva un GLE no es bien conocido, aunque se observa una asociación con las erupciones solares, se ha examinado el origen con observaciones de eyecciones de masa coronal, explosiones de radio tipo II y flujos de rayos X suaves (Gopalswamy *et al.*, 2010); otros estudios en el tema presentan periodicidades comunes entre los indicadores solares de la cromosfera y corona revelando que los eventos altamente energéticos no son un fenómeno local, asociando una sincronía entre las diferentes capas de la atmósfera solar (Pérez-Peraza *et al.*, 2008). Las repercusiones de estos eventos en las redes de telecomunicaciones y estaciones eléctricas son bien conocidas, y es por esto que se pretende anticipar su ocurrencia. La principal aplicación en ingeniería es encontrar características espectrales que se puedan dirigir como precursor de un GLE.

Los rayos cósmicos galácticos (RCG) son partículas energéticas con un registro continuo en los monitores de neutrones, exploran la atmosfera solar y con ello brindan información sobre el medio circundante, principalmente la estructura de medio interplanetario; la señal se encuentra modulada con frecuencias características ofreciendo información sobre la física solar, así la señal captada por los monitores de neutrones se encuentra afectada en gran parte por procesos que se llevan a cabo dentro de la estrella. Los RCG contienen información del estado del clima espacial y al gestarse un GLE la atmosfera solar comienza a cambiar, postrando características distintas en la señal de RCG, características que en una atmosfera lejana a un evento no se muestran o por lo menos no son comunes.

La transformada wavelets permite describir señales no estacionarias proponiendo un enfoque de análisis más completo que la transformada de Fourier. Un GLE se describe como un evento de rápida transitoriedad el cual es ideal para el análisis wavelet; el contenido en frecuencia de los RCG antes y después de un evento altamente energético puede correlacionarse con frecuencias de otros índices de actividad solar proporcionando información sobre las conexiones entre diferentes capas solares. El análisis por medio de wavelets permite identificar cómo impacta un GLE sobre la señal de RCG, un incremento instantáneo en el número de partículas es descrito con un espectro de potencia característico; proponemos una clasificación de los GLE en función de su espectro de potencia wavelet que puede proporcionar información sobre los mecanismos que lo generan.

Los periodos en la señal de RCG presenta comportamientos característicos a medida que se acerca de fecha del evento, puesto que éste patrón peculiar no es común fuera de los periodos de ocurrencia de GLE, éste resultado puede ser utilizado como herramienta de pronóstico. Las características que observamos en los espectros de potencia wavelet en gran parte se encuentran en función de nuestra capacidad de percepción (el espectro está sujeto a una interpretación); para validar las observaciones proponemos el Análisis de Componentes Principales (ACP).

Además de reducir la dimensionalidad de los datos, otro de los objetivos en el ACP se enfoca a la predicción o reconocimiento de patrones; éste método tiene grandes aplicaciones en la identificación de rostros, huellas digitales, etc.; podemos utilizar el mismo concepto y enfocarlo al reconocimiento de espectros de potencia wavelet. La técnica es implementada para aprobar la premisa de que el precursor existe, suponemos que ventanas temporales que preceden un GLE contienen una distribución específica en los periodos que consideramos como precursores, así entonces, ventanas lejanas a un evento mostraran configuraciones distintas a las ventanas que llamaremos precursoras.

Todas las pruebas realizadas dan por resultado que un conjunto de espectros que preceden eventos altamente energéticos son distintos a espectros lejanos a los mismos eventos. Las conclusiones finales se enfocan a la disposición de abordar el estudio de precursores de protones relativistas solares, para caracterizar a detalle las observaciones realizadas en este trabajo y proponer la posibilidad de un monitoreo en tiempo real para la predicción de los próximos GLE. Por otra parte la clasificación de los GLE por medio del espectro de potencia wavelet puede aportar algunos datos para la explicación de mecanismos físicos comunes entre los GLE y la estructura solar.

INTRODUCCIÓN

El estudio del sol es de gran importancia para entender los fenómenos existentes en el universo y nuestro planeta. El interés sobre su campo magnético, el comportamiento de densidad y temperatura, las distintas características en las capas solares, la emisión y aceleración de partículas, etc., tiene a expertos en física espacial y otras disciplinas en constantes estudios y observaciones para la búsqueda de modelos que sean lo más próximos a la realidad.

Los RCG son partículas energéticas con velocidades cercanas a la velocidad de la luz, en su mayoría protones. Aunque se desconoce el origen de las energías tan altas se cree son producidos por fuentes como el sol, supernovas, estrella de neutrones, hoyos negros, núcleos activos de galaxias u otras fuentes del universo. Estas partículas bañan la heliósfera y al espacio interestelar isotrópicamente, cruzando en su camino la atmósfera solar cuya fenología causa diversas modulaciones. Su detección es por una red de monitores con base en tierra. Esta señal cuasi-estacionaria contiene periodos característicos que podemos estudiar por el análisis de Fourier y análisis Wavelet. Muy de vez en cuando se registran incrementos bruscos en los contadores de partículas, los cuales se asocian a protones con energías mayores a 500[MeV] denominados *protones relativistas solares o eventos a nivel de suelo (GLE)*, con capacidad de penetrar la atmosfera terrestre y dañar las redes eléctricas y de telecomunicaciones. Su impacto sobre la salud aún se investiga. La principal aplicación en ingeniería es encontrar un precursor que permita anticipar estos eventos.

Hasta la fecha se tienen registrados 70 GLE considerados eventos estocásticos; creemos que antes de la ocurrencia de un GLE la señal de RCG registra perturbaciones que se reflejan con un contenido espectral característico. Analizar la señal de RCG y los GLE es el principal objetivo de esta tesis; con los elementos necesarios sobre el análisis de señales tales como la *Transformada Discreta de Fourier* y la *Transformada Wavelet* buscamos estos precursores. El espectro wavelet arroja una imagen que describe la distribución de periodos en una ventana de tiempo, esta imagen la estudiamos por el Análisis de Componentes Principales (ACP).

El análisis de componentes principales es una herramienta matemática que es utilizada para el reconocimiento de patrones, su aplicación en los espectros de potencia wavelet arroja resultados interesantes respecto a la búsqueda del precursor.