

Informe Científico-Técnico

“Caracterización del sistema dinámico Viento Solar-
Magnetosfera-Ionosfera.
Pronóstico de índices geomagnéticos”

Proyecto:

“Análisis y caracterización de eventos solares tipo pulsantes con estructura temporal fina y del sistema dinámico Viento Solar-Magnetosfera-Ionosfera”

Programa:

“Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

Institución ejecutora:

Instituto de Geofísica y Astronomía

J’ Proyecto: Lic. Adolfo L. Méndez Berhondo

Grado Científico: Doctor en Ciencias Geofísicas

Categoría Científica: Investigador Titular

Departamento de Astronomía, Instituto de Geofísica y Astronomía

Agencia de Medio Ambiente

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

La Habana, Cuba

- 2014 -

Índice

Resumen	24
Introducción	24
Materiales y Métodos	25
Resultados y Discusión	26
Conclusiones	26
Bibliografía	27
Anexos	27

Resumen (200 palabras)

Parte de este Informe está dedicado al pronóstico del índice geomagnético Kp. El índice geomagnético Kp se calcula a partir de las mediciones de trece estaciones localizadas alrededor de la Tierra entre las latitudes geomagnéticas 48° y 63° y es un estimado de la actividad geomagnética y se utiliza como uno de los parámetros de entrada en muchos modelos ionosféricos y magnetosféricos. La finalidad del modelo es pronosticar los tres valores posteriores al último valor medido del índice Kp (las próximas 9 horas). Se utilizan datos históricos del índice Kp para desarrollar una metodología que permita hacer un pronóstico del mismo en un intervalo de tiempo, como mínimo, de tres horas. Se obtuvo un valor del 68.5% en la correlación lineal entre los valores pronosticados y los valores reales que, teniendo en cuenta que se trabajó solamente sobre la serie temporal estocástica del Kp, este valor de correlación puede considerarse satisfactorio.

Otra parte de este Informe resume los resultados obtenidos en la caracterización y modelación de nubes magnéticas a partir de mediciones de parámetros del viento solar. Se hace un análisis de la entropía espacio-temporal del campo magnético del medio interplanetario para caracterizar un total de 41 nubes magnéticas.

Introducción

El acoplamiento y la interacción entre el viento solar y la magnetosfera e ionosfera terrestres, es uno de los problemas fundamentales en física espacial para la modelación y pronóstico del clima espacial. La visión científica actual sobre este campo de estudio es de naturaleza integradora y está fundamentalmente orientada a la comprensión de los diversos mecanismos de acoplamiento y transferencia de energía entre los medios plasmáticos involucrados, existiendo muchos problemas abiertos en este campo del conocimiento. Para estos estudios se utilizarán las modernas técnicas del análisis no lineal de series temporales y la teoría de sistemas dinámicos no lineales.

Actualmente existe una evidencia creciente de los efectos del clima espacial en las actuales tecnologías, tanto de fines científicos como domésticos. Por ello se incrementa la necesidad de pronósticos cada vez más precisos del estado y evolución de los fenómenos que conforman el llamado Clima Espacial, ya que la sociedad moderna cada día es más dependiente de los modernos medios de comunicación actual, así como que los satélites de comunicación cada vez poseen componentes electrónicos más susceptibles de ser dañados por perturbaciones en el medio interplanetario provocadas por la actividad solar. Por lo que el mejoramiento continuado de las predicciones y pronósticos no puede ser logrado hasta que no se haya ganado una mayor comprensión y conocimiento sobre el funcionamiento de todos los eslabones de la cadena de acoplamiento de eventos solar-terrestres.

Es por ello que entre los grandes retos científicos para la física espacial contemporánea aun persiste la problemática de comprender cómo funciona la dinámica del acoplamiento entre el viento solar y la magnetosfera e ionosfera terrestre (Yermolaev *et al.* 2005). Para esto se continúan realizando estudios mediante el análisis de correlación entre parámetros del viento solar e índices de actividad magnética y de tipo dimensional entre los diversos parámetros físicos involucrados (Vasyliunas *et al.* 1982). En estos estudios también se han estado aplicando técnicas del análisis no lineal a diversas series temporales de parámetros físicos del viento solar e índices geomagnéticos (ej. Polygiannakis y Moussas 1994, Ojeda *et al.* 2005).

Uno de los métodos fundamentales que se emplean es el análisis de series temporales tanto desde el enfoque estadístico como el de sistemas no lineales cuyo propósito general es determinar, a partir de mediciones regulares de diversos parámetros físicos del viento solar, la magnetosfera y la ionosfera; propiedades fundamentales que identifiquen patrones inmersos en ruidos, tendencias y/o estructuras coherentes; de forma tal que cuantifiquen determinados comportamientos o fenómenos en la dinámica del sistema.

NOTA: Al final de este Informe Científico-Técnico se anexan cuatro artículos publicados en los cuales se pueden seguir en detalle todos los aspectos tratados en este Informe Científico-Técnico.

Materiales y Métodos

Para el pronóstico del índice Kp se utilizaron los valores históricos archivados en el centro mundial de datos geomagnéticos, de la Universidad de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/kp/index.html>) desde 1932 hasta el 2012. El Kp es un índice trihorario (que se procesa cada tres horas) cuasi-logarítmico que estima la actividad geomagnética. Durante un día se calculan ocho valores de Kp en intervalos de tres horas en tiempo universal (UT): 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 UT.

Los métodos probados para realizar el pronóstico fueron:

- 1) Método autoregresivo, conocido en la literatura como AR,
- 2) Método MA (moving-average process),
- 3) Combinación de los métodos anteriores, conocido en la literatura como ARMA (*autoregressive moving-average process with AR*).
- 4) Método ARIMA (*autoregressive integrated moving-average process*).
- 5) Método conocido en la literatura como FARIMA (*fractional, autoregressive, integrated moving-average process*).

Para la caracterización y modelación de nubes magnéticas a partir de mediciones de parámetros del viento solar se utilizaron datos referidos al campo magnético del medio interplanetario (componentes x, y, z). Las nubes magnéticas tiene una gran importancia por su geoeffectividad debido a su alta velocidad de propagación y a que la dirección del campo magnético asociado rota suavemente en la nube, lo que retiene la polaridad durante un tiempo relativamente largo, permitiendo que sea más efectiva la transferencia de energía entre ella y la magnetosfera terrestre cuando esta es alcanzada por aquella y se verifica una reconexión magnética entre ambas. Se analizaron 41 nubes magnéticas durante el período entre marzo de 1998 a diciembre de 2003. La lista fue tomada de Huttunen et al. (2005). Se hace un análisis de la entropía espacio-temporal del campo magnético del medio interplanetario para caracterizar las 41 nubes magnéticas. La entropía espacio-temporal está referida a los diagramas de recurrencia (recurrence plots, Eckmann et al. 1987) y hace un análisis de la estructura de la serie de tiempo reproducida en un diagrama de recurrencia en los dominios espacio y temporal. A través de este análisis se puede detectar gráficamente patrones ocultos y cambios de estructura temporal de la serie temporal reproducida en el diagrama de recurrencia. El resultado es presentado en porcentaje: entropía de 100% significa total ausencia de estructura en el diagrama de recurrencia y representa una serie temporal referida a un proceso puramente aleatorio; una entropía de 0% significa implica una estructura “perfecta” en

el diagrama de recurrencia y por tanto, una serie con predictibilidad absoluta. Por último, se desarrolla una metodología para caracterizar las nubes magnéticas a base de transformadas wavelet en tres regiones diferentes de la nube magnética.

Resultados y Discusión

§1.- Pronóstico del índice Kp

Durante este trabajo fue propuesto hacer un pronóstico del índice planetario Kp a partir de la serie histórica que comenzó a ser publicada a partir del año 1932. Fueron utilizados cinco modelos autoregresivos, que usan polinomios de interpolación para hacer la predicción de series temporales. Todos los métodos probados son funciones ya implementadas. Las pruebas realizadas mostraron la utilidad de estos modelos para hacer el pronóstico de 9 horas del índice Kp. El modelo AR se propone como el de menos costo computacional ofreciendo buenos resultados. El modelo ARIMA es eficiente para la predicción del Kp perturbado.

Se ofrece una forma rápida y suficientemente eficiente de hacer una predicción del índice Kp, sin necesidad de usar datos de satélites que muchas veces demoran en ser publicados. Se obtuvo un valor del 68.5% en la correlación lineal entre los valores pronosticados y los valores reales que, teniendo en cuenta que se trabajó solamente sobre la serie temporal estocástica del Kp, este valor de correlación puede considerarse satisfactorio.

§2.- Nubes magnéticas

Del análisis de los diagramas de recurrencia de las 41 nubes magnéticas se encontró que los valores de la entropía espacio-temporal son más bajos, en general, que para la región del viento solar en la que está embebida la nube. No obstante, la distribución de los valores de la entropía espacio-temporal es más uniforme en esta última que en las nubes magnéticas. También se encontró que existe una notoria diferencia en los valores de la entropía espacio-temporal para las tres componentes (x, y, z) del campo magnético dentro de la nube magnética.

Conclusiones

Las conclusiones se resumen en:

- 1) fueron validados los cinco métodos estadísticos utilizados para el pronóstico del índice geomagnético Kp a partir de datos históricos,
- 2) los modelos que utilizan datos de viento solar (Wing *et al.* 2005) obtienen una correlación de aproximadamente 77 %. No obstante, es un valor que está dentro del intervalo de error esperado y concluimos que los modelos autoregresivos son válidos para efectuar el pronóstico,
- 3) los pronósticos hechos con los modelos MA y FARIMA no muestran buenos resultados. MA subestima los valores de Kp en casi toda la ventana de tiempo seleccionada y FARIMA los sobrestima,
- 4) con los restantes tres modelos AR, ARMA y ARIMA se obtienen buenos pronósticos del índice Kp. El modelo ARIMA tiene un ajuste lineal de la tendencia de la serie temporal lo

que funciona mejor para los casos de índices Kp en períodos geomagnéticamente perturbados y por eso consideramos que es el mejor modelo para ser utilizado en estos casos. Los resultados con AR también resultan ser buenos con el agregado de que con este modelo los tiempos de cálculo son mucho menores; lo que consideramos lo coloca como la opción más eficiente a ser utilizada para los fines de pronóstico,

- 5) los valores de la entropía espacio-temporal son más bajos que para la región del viento solar en la que está embebida la nube. Esto es debido a que la dirección del campo magnético dentro de la nube rota más suavemente además de ser mas intenso,
- 6) la distribución de los valores de la entropía espacio-temporal es más uniforme en esta última que en las nubes magnéticas,
- 7) la diferencia en los valores de la entropía espacio-temporal para las tres componentes (x, y, z) del campo magnético dentro de la nube magnética indica una anisotropía en la estructura de la nube magnética (Bothmer y Schwenn 1994, 1998).

Bibliografía

- Bothmer, V. y Schwenn, R.: “Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind”, Sp. Sci. Rev. **70**, 215-220 (1994).
- Bothmer, V. y Schwenn, R.: “The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind”, Ann. Geophys. **16**, 1-24 (1998).
- Eckmann J. P, Kamphorst S. O. y Ruelle D.: “Recurrence plots of dynamical systems”, Europhys. Lett. **4**, 973-977 (1987).
- Huttunen K. E. J., Bothmer V. y Koskinen H. E. J.: “ Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23” ,Ann. Geophys. **23**, 1-17 (2005).
- Ojeda A., Calzadilla A., Lazo B., Alazo K. y Savio S.: “Solar wind parameters behavior in different IMF conditions using two non lineal dynamics techniques”, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. **67**, 1859-1864 (2005).
- Polygiannakis, J. M. y Moussas X.: “On experimental evidence of chaotic dynamics over short time scales in solar wind and cometary data using nonlinear prediction techniques”, So. Phys. **151**, 341-350 (1994).
- Vasyliunas, V. M., Kan J. R., Siscoe G. L. y Akasofu S.-I.: “Scaling relations governing magnetospheric energy transfer”, Planet. Sp. Sci. **30**, 359-365 (1982).
- Wing S., Johnson J. R., Jen J., Meng C. -I., Sibeck D. G., Bechtold K., Freeman J., Costello K., Balikhin M. y Takahashi K.: “Kp forecast models”, J. Geophys. Res. **110**, A4 (2005).
- Yermolaev Y. I., Yermolaev M. Y., Zastenker G. N., Zelenyi L. M., Petrukovich A. A. y Sauvaud J.-A.: “Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review”, Planet. Sp. Sci. **53**, 189-196 (2005).

Anexos

Anexo 1: artículo “Pronóstico del índice planetario Kp usando modelos autoregresivos”. Publicado en *Ciencias de la Tierra y el Espacio* (2014).

Anexo 2: artículo “Spatio-temporal entropy analysis of the magnetic field to help magnetic cloud. Publicado en *Journal of Geophysical Research* (2013).

Anexo 3: artículo “Daubechies wavelet coefficients: a tool to study interplanetary magnetic field fluctuations”. Publicado en *Geofísica Internacional* (2014).

Anexo 4: artículo “Study of local regularities in solar wind data and ground magnetograms”. Publicado en *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (2014).