

# Proyecto: Clima espacial y Rayos Cósmicos

D. Sierra-Porta\*, M. Tarazona-Alvarado\*\*

Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

## Resumen

En el presente documento se exponen los objetivos y metodología para la consolidación de un proyecto encaminado al estudio de las relaciones entre Intensidad de Rayos Cósmicos Galácticos y Actividad Solar desde distintos tipos de vista. Para tales fines, se exponen algunas de las metodologías usadas y algunos resultados preliminares que se tienen a la fecha. El siguiente es un documento de trabajo de resumen de las actividades llevadas a cabo dentro del proyecto.

## Índice

<b>I Ánimos y motivaciones</b>	2
1. Introducción	2
2. Objetivos	3
3. Datos y Métodos	3
3.1. Datos disponibles	3
3.2. Metodologías	4
3.2.1. Análisis de Componentes Principales aplicado a las características de la dinámica solar en ciclos solares	4
3.2.2. Análisis estadístico multivariado	5
3.2.3. Machine Learning	5
<b>II Algunos resultados</b>	6
4. Intensidad de Rayos Cósmicos y Actividad Solar	6

## Índice de cuadros

## Índice de figuras

1. Izquierda: Intensidad de los rayos cósmicos para el período de años entre 1976 y 2008. El eje horizontal se encuentra en unidades de fracciones de años. La columna vertical representa el valor real de conteos/min para la intensidad de los rayos cósmicos. Derecha: Función de correlación cruzada para cuatro variables consideradas para el período de años entre 1976 y 2008. El eje horizontal se encuentra en unidades de fracciones simétricas de años para el valor de retraso. [Sierra-Porta, 2018]. 6

---

\*david.sierra1@correo.uis.edu.co

\*\*jose.tarazona5@correo.uis.edu.co

# Parte I. Ánimos y motivaciones

## 1. Introducción

La variación de 11 años en la intensidad de los rayos cósmicos galácticos (GCR) generalmente se asocia con una variación similar de la actividad solar (SA); existe una anticorrelación entre ellos. En una serie de trabajos clásicos que datan de 1954, Forbush estableció la existencia de una anti-correlación cíclica de 11 años entre la intensidad de rayos cósmicos galácticos y la actividad solar, medida por el número de manchas solares. También fue el primero en identificar una variación cíclica de 22 años de la anisotropía diurna de intensidad de rayos cósmicos. Se puede encontrar una compilación conveniente de estos documentos y muchos otros sobre temas relacionados junto con una serie editada de las lecciones de Forbush en *Cosmic Rays, the Sun and Geomagnetism: The Works of Scott E. Forbush* [Forbush and Van Allen, 1993]. En estudios posteriores realizados por muchos otros, la anti-correlación aproximadamente sincrónica entre la intensidad de rayos cósmicos galácticos y el número de manchas solares se ha confirmado y ampliado masivamente mediante el uso de telescopios terrestres y monitores de neutrones y de numerosos instrumentos transportados en naves espaciales en órbita alrededor de la Tierra y para grandes distancias en el medio interplanetario.

La modulación solar de la intensidad de los rayos cósmicos sigue siendo una característica central de la física heliosférica. Es un efecto importante. Por ejemplo, la intensidad interplanetaria de los rayos cósmicos galácticos ( $E_p > 80$  MeV) varía en un factor de aproximadamente 2.1 durante un ciclo de 11 años, siendo mayor poco después del tiempo de actividad solar mínima y menos pronto después del tiempo de actividad solar máxima. Las observaciones de Pioneer 10 y Voyager 1 continúan hacia el exterior a distancias heliocéntricas superiores a 76 UA, buscando evidencia directa de la ubicación del límite de modulación, que se estima que se encuentra a aproximadamente 100 UA o más.

La interpretación predominante del efecto de modulación después de Parker [Parker, 1992] [Parker, 1965] depende de las observaciones del viento solar, el gas ionizado caliente ( $10^3$  K) que fluye radialmente hacia afuera desde la corona del Sol, y más específicamente del campo magnético turbulento que es causado por un sistema arrastrado de corrientes eléctricas en el ionizado gas y por ondas de plasma.

Desde el punto de vista de los rayos cósmicos cargados eléctricamente, el viento solar se visualiza como una nube de centros de dispersión magnetizados transportados hacia el exterior desde el Sol a una velocidad típica de  $450 \text{ km s}^{-1}$  cerca del ecuador heliográfico y  $750 \text{ km s}^{-1}$  en latitudes heliográficas altas [Phillips et al., 1995]. A medida que los rayos cósmicos de fuentes astrofísicas distantes se acercan al Sol, están influenciados en al menos tres formas importantes.

- Primero, la nube de centros de dispersión constituye un medio adifusivo;
- segundo, el transporte hacia afuera de la estructura del campo magnético convence los rayos cósmicos hacia afuera;
- y tercero, al hacerlo, la energía de los rayos cósmicos se reduce por la desaceleración adiabática.

Más recientemente, los efectos de las derivaciones de gradiente y curvatura en el campo magnético a gran escala de la heliosfera se han incorporado a la teoría del transporte. En un estado cuasi estacionario, el equilibrio entre la difusión hacia adentro, la convección hacia afuera y las desviaciones a gran escala produce una disminución monotónica de la intensidad del rayo cósmico desde su valor en el medio interestelar cercano hasta valores menores dentro del límite de modulación. Parece que el cambio más importante durante un ciclo de 11 años es que el coeficiente de difusión es menor durante los períodos de alta actividad solar que durante los períodos de baja actividad solar. Además, las propiedades del viento solar son una función importante de la latitud heliográfica [Phillips et al., 1995] [Smith et al., 1995] [Smith and Balogh, 2007] [Balogh et al., 1999] y también fluctúan de manera importante de forma esporádica a medida que fluctúa la actividad solar.

Otro elemento del problema es la variación cíclica de 22 años de la polaridad del campo magnético dipolar del Sol.

La modulación solar de la intensidad de los rayos cósmicos galácticos recibidos en la Tierra, como consecuencia de los cambios de topología del campo magnético interplanetario en el curso del ciclo solar, está relacionada con la estructura y actividad de la corona solar. Esta relación ha sido medida por muchos autores.

Aunque SN no es el único de los parámetros que determinan la dinámica de la corona solar y, por lo tanto, la actividad del sol, estos se utilizan como uno de los parámetros solares confiables y fácilmente disponibles que proporcionan información sobre la variabilidad de la actividad solar y son convenientes y representan un buen parámetro de medición que se puede combinar y complementar con otros para una comprensión más precisa como parámetro solar en los estudios de rayos cósmicos. El número de manchas solares como parámetro activo se ha utilizado para la investigación principalmente porque se sabe que las erupciones solares emanan de los lugares donde ocurren las manchas solares y eventualmente se dispersan en la dirección de la tierra. Los rayos cósmicos galácticos en el rango de energía de varios cientos de MeV a unos pocos GeV están sujetos a modulación heliosférica porque la producción solar y su variación afectan su intensidad y espectro durante el ciclo de actividad solar de aproximadamente 11 años [Schwabe, 1844].

Es bien sabido que la variación de intensidad de los rayos cósmicos muestra una correlación inversa con el número de manchas solares. Pero, en general, se observa que el número máximo / mínimo de manchas solares no coincide con la intensidad mínima / máxima de rayos cósmicos. Las observaciones de rayos cósmicos a largo plazo por medio de monitores de neutrones ahora nos permiten distinguir los efectos de modulación relacionados con el ciclo magnético solar de 22 años de los efectos debidos al ciclo de actividad solar de 11 años. Popielawska y otros [Popielawska, 1992] [Popielawska, 1995] informaron una correlación positiva al estudiar las variaciones de los ciclos solares de alrededor de 11 años y los ciclos de actividad magnética de alrededor de 22 años utilizando observaciones de un par de neutrones Climax-Huancayo y confirmados para el neutrón Kiel-Tsumeb detectores con diferente rigidez de corte, latitudes y longitudes, observando una relación de dependencia entre las variaciones de los ciclos solares y los ciclos magnéticos asociados con los cambios de polaridad de estos últimos. El objetivo final era hacerse una idea sobre la modulación de los rayos cósmicos y otras características fundamentales de los rayos cósmicos.

En otro informe [Mishra, 2005] también ha realizado un estudio detallado en este caso midiendo la correlación entre diferentes tipos de observables para la modulación de los ciclos solares y la intensidad de los rayos cósmicos. Para este caso, han utilizado grandes conjuntos de datos con una resolución mensual entre los años 1950 y 2003 correspondientes a los ciclos solares 20 a 23. En este informe, los valores mensuales corregidos por presión de los rayos cósmicos se obtienen de los datos de los monitores de neutrones Kiel para el período 1950- 2003. Los valores medios del número de manchas solares se han tomado de los datos geofísicos solares. Observan una correlación negativa y alta entre la actividad solar y los rayos cósmicos. El interés en estudiar las correlaciones de los rayos cósmicos con diferentes tipos de indicadores de actividad solar es interesante desde el punto de vista de entender las interrelaciones entre ambas variables [Dorman and Dorman, 1967] [Usoskin et al., 1998] [Van Allen, 2000].

Muchos otros investigadores han estudiado este fenómeno teniendo en cuenta el efecto de histéresis entre estas dos variables y otros parámetros de la actividad solar, que también es útil para la estimación de la región moduladora de la heliosfera utilizando en este caso valores mensuales para índices y rayos cósmicos. intensidad, para una revisión de este tema podemos reenviar a [Mavromichalaki et al., 2011] [Mavromichalaki and Petropoulos, 1984] [Mavromichalaki et al., 1998] [Paouris et al., 2012] y referencias allí.

Una particularidad interesante de estos trabajos incluye la generación de nuevos índices construidos como una combinación lineal de índices individuales que utilizan para tal cálculo de la correlación máxima para la intensidad de los rayos cósmicos, utilizando detectores de monitor de neutrones, una distinción entre ciclos solares pares e impares, así como entre las fases descendente y ascendente de ellos, está bien establecido por estos autores. Recientemente, se ha logrado una nueva técnica estadística llamada “correlación cruzada” ampliamente utilizada en muchos campos y aplicaciones para estudiar la correlación entre SN e ICR.

## 2. Objetivos

Este proyecto se fundamenta en las ideas expresadas anteriormente y busca estudiar la relación de los rayos cósmicos con la dinámica del sol en su actividad. Por lo que se proponen los siguientes objetivos.

- Estudiar la dinámica solar a partir de distintos índices de actividad solar a partir de métodos estadísticos para establecer variables con mayor importancia para la correlación efectiva con rayos cósmicos galácticos.
- Estudiar la factibilidad de la identificación y definición de nuevos índices de actividad solar que se correlacionen más efectivamente con la intensidad de rayos cósmicos.
- Utilizar técnicas de *Machine Learning* para la predicción de rayos cósmicos.
- Estudiar la modulación de rayos cósmicos en términos de la posición geográfica de los detectores disponibles en la superficie de la tierra y relacionados con los ciclos solares.

## 3. Datos y Métodos

### 3.1. Datos disponibles

Los datos recopilados en este proyecto provienen de muchas y variadas fuentes. Para el caso de rayos cósmicos galácticos se dispone de una fuente de datos grande de detectores localizados en muchas partes del mundo. Hemos recopilado datos de observatorios de detectores de neutrones, detectores de muones.

La base de datos de monitores de neutrones en tiempo real (o NMDB) es una red mundial de monitores de neutrones estandarizados, utilizados para registrar variaciones de los rayos cósmicos primarios. Las mediciones complementan las mediciones de rayos cósmicos basadas en el espacio.

A diferencia de los datos de los experimentos satelitales, los datos del monitor de neutrones nunca han estado disponibles en alta resolución desde muchas estaciones en tiempo real. Los datos a menudo solo están disponibles en el sitio web de las estaciones individuales, en diferentes formatos y no en tiempo real. Para superar este déficit, la Comisión Europea apoya la Base de datos de monitor de neutrones en tiempo real (NMDB<sup>1</sup>) como un proyecto de Infraestructuras electrónicas en el Séptimo Programa Marco en la sección de Capacidades. Las estaciones que no tienen una resolución de 1 minuto serán respaldadas por el desarrollo de un sistema de registro estándar asequible que enviará las mediciones a la base de datos a través de Internet en tiempo real. Esto resuelve el problema de los diferentes formatos de datos y, por primera vez, permite utilizar mediciones de rayos cósmicos en tiempo real para las predicciones del clima espacial [Steigies, 2009] [Klein et al., 2009].

Además de crear una base de datos y desarrollar aplicaciones que trabajen con estos datos, una parte del proyecto se dedica a crear un sitio web de divulgación pública para informar sobre los rayos cósmicos y los posibles efectos en los humanos, los sistemas tecnológicos y el medio ambiente [Mavromichalaki et al., 2011].

Para el caso del estudio de la dinámica solar, los datos usados también provienen de distintas fuentes. En particular, el conjunto de datos OMNI (LRO<sup>2</sup>) de baja resolución es principalmente una compilación desde 1963 a la actualidad de datos de parámetros de plasma y campo magnético de viento solar cerca de la Tierra promediados por hora de varias naves espaciales en órbitas geocéntricas o L1 (punto de Lagrange). Los datos se compararon ampliamente y, para algunas naves espaciales y parámetros, se normalizaron de forma cruzada. Los cambios de tiempo de los datos de mayor resolución a los tiempos de llegada esperados de la magnetosfera se realizan para datos de naves espaciales en órbitas L1 (ISEE 3, Viento, ACE), antes de tomar promedios por hora.

LRO también proporciona otros datos de amplio acceso que se utilizan con frecuencia con datos de viento solar. En particular, LRO proporciona flujos de protones con energías superiores a 1, 2, 4, 10, 30 y 60 MeV desde varias naves espaciales IMP y GOES, y proporciona una amplia gama de índices de actividad geomagnética y solar. Los datos están disponibles en resoluciones diarias y de 27 días, además de la resolución por hora. Se hacen accesibles con una variedad de funcionalidades de <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>. El conjunto de datos de alta resolución OMNI (HRO) incluye datos de campo magnético de viento solar y plasma de 1 minuto y 5 minutos desplazados por la proa del arco del arco y datos de IMP 8, Geotail, Wind y ACE [King and Papitashvili, 2005] [Papitashvili and King, 2004].

## 3.2. Metodologías

### 3.2.1. Análisis de Componentes Principales aplicado a las características de la dinámica solar en ciclos solares

El análisis de componentes principales (PCA) es un procedimiento estadístico que utiliza una transformación ortogonal para convertir un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables linealmente no correlacionadas llamadas componentes principales. Esta transformación se define de tal manera que el primer componente principal tiene la mayor varianza posible (es decir, representa la mayor variabilidad posible en los datos), y cada componente subsiguiente a su vez tiene la mayor varianza posible bajo la restricción que es ortogonal a los componentes anteriores. Los vectores resultantes (cada uno de los cuales es una combinación lineal de las variables y contiene  $n$  observaciones) son un conjunto de bases ortogonales no correlacionadas. PCA es sensible a la escala relativa de las variables originales.

PCA fue inventado en 1901 por Karl Pearson [Pearson, 1901] como un análogo del teorema del eje principal en mecánica; más tarde fue desarrollado independientemente y nombrado por Harold Hotelling en la década de 1930 [Hotelling, 1933]. Dependiendo del campo de aplicación, también se llama la transformación discreta de Karhunen-Loève (KLT) en el procesamiento de señales, la transformación de Hotelling en el control de calidad multivariante, la descomposición ortogonal adecuada (POD) en ingeniería mecánica, la descomposición de valores singulares (SVD) de  $X$  (Golub y Van Loan, 1983), descomposición del valor propio (EVD) de  $XTX$  en álgebra lineal, análisis factorial, Eckart-Teorema de Young (Harman, 1960), o funciones ortogonales empíricas (EOF) en ciencia meteorológica, descomposición empírica de función propia (Sirovich, 1987), análisis de componentes empíricos (Lorenz, 1956), modos cuasi-armónicos (Brooks et al., 1988), descomposición espectral en ruido y vibración, y análisis empírico modal en dinámica estructural.

<sup>1</sup> NMDB: Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements: <http://www.nmdb.eu/>

<sup>2</sup> NASA's Space Physics Data Facility (SPDF). El SPDF es un proyecto de la División de Ciencia de Heliofísica (HSD) en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA. SPDF consiste en servicios basados en web para encuestas y datos y trayectorias de alta resolución. La instalación admite datos de la mayoría de las misiones de heliofísica de la NASA para promover la investigación correlativa y colaborativa a través de los límites de la disciplina y la misión. [https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/html/ow\\_data.html](https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html)

PCA se utiliza principalmente como herramienta en el análisis exploratorio de datos y para hacer modelos predictivos. A menudo se usa para visualizar la relación entre poblaciones. El PCA se puede hacer mediante la descomposición del valor propio de una matriz de covarianza de datos (o correlación) o la descomposición de valores singulares de una matriz de datos, generalmente después de un paso de normalización de los datos iniciales. La normalización de cada atributo consiste en centrar la media, restando cada valor de datos de la media medida de su variable para que su media empírica (promedio) sea cero, y, posiblemente, normalizando la varianza de cada variable para que sea igual a 1. Los resultados de un PCA generalmente se discuten en términos de puntajes de componentes, a veces llamados puntajes de factores (los valores de las variables transformadas que corresponden a un punto de datos en particular) y cargas (el peso por el cual cada variable original estandarizada debe multiplicarse para obtener el puntaje de componentes). Si los puntajes de los componentes están estandarizados a la varianza de la unidad, las cargas deben contener la varianza de datos en ellos (y esa es la magnitud de los valores propios). Si los puntajes de los componentes no están estandarizados (por lo tanto, contienen la varianza de datos), las cargas se deben escalar en unidades ("normalizadas") y estos pesos se denominan vectores propios; son los cosenos de la rotación ortogonal de variables en componentes principales o hacia atrás.

PCA es el más simple de los verdaderos análisis multivariados basados en vectores propios. A menudo, se puede pensar que su funcionamiento revela la estructura interna de los datos de una manera que explica mejor la variación en los datos. Si un conjunto de datos multivariante se visualiza como un conjunto de coordenadas en un espacio de datos de alta dimensión (1 eje por variable), PCA puede proporcionar al usuario una imagen de menor dimensión, una proyección de este objeto cuando se ve desde su punto de vista más informativo [cita requerida]. Esto se hace utilizando solo los primeros componentes principales para que se reduzca la dimensionalidad de los datos transformados. PCA está estrechamente relacionado con el análisis factorial. El análisis factorial típicamente incorpora más supuestos específicos del dominio sobre la estructura subyacente y resuelve los vectores propios de una matriz ligeramente diferente. PCA también está relacionado con el análisis de correlación canónica (CCA). CCA define sistemas de coordenadas que describen de manera óptima la covarianza cruzada entre dos conjuntos de datos, mientras que PCA define un nuevo sistema de coordenadas ortogonales que describe de manera óptima la varianza en un único conjunto de datos [Barnett and Preisendorfer, 1987] [Hsu et al., 2012].

### 3.2.2. Análisis estadístico multivariado

En el modelado estadístico, el análisis de regresión es un conjunto de procesos estadísticos para estimar las relaciones entre una variable dependiente (a menudo llamada "variable de resultado") y una o más variables independientes (a menudo llamadas "predictores", "covariables" o "características"). La forma más común de análisis de regresión es la regresión lineal, en la cual un investigador encuentra la línea (o una función lineal más compleja) que se ajusta más a los datos de acuerdo con un criterio matemático específico. Por ejemplo, el método de mínimos cuadrados ordinarios calcula la línea única (o hiperplano) que minimiza la suma de las distancias al cuadrado entre los datos verdaderos y esa línea (o hiperplano). Por razones matemáticas específicas, esto le permite al investigador estimar la expectativa condicional (o valor promedio de la población) de la variable dependiente cuando las variables independientes toman un conjunto dado de valores. Las formas menos comunes de regresión utilizan procedimientos ligeramente diferentes para estimar parámetros de ubicación alternativos o estimar la expectativa condicional a través de una colección más amplia de modelos no lineales (por ejemplo, regresión no paramétrica).

El análisis de regresión se usa principalmente para dos propósitos conceptualmente distintos. Primero, el análisis de regresión se usa ampliamente para la predicción y el pronóstico, donde su uso tiene una superposición sustancial con el campo del aprendizaje automático. Segundo, en algunas situaciones, el análisis de regresión puede usarse para inferir relaciones causales entre las variables independientes y dependientes. Es importante destacar que las regresiones por sí mismas solo revelan relaciones entre una variable dependiente y una colección de variables independientes en un conjunto de datos fijo. Para usar regresiones para la predicción o para inferir relaciones causales, respectivamente, un investigador debe justificar cuidadosamente por qué las relaciones existentes tienen poder predictivo para un nuevo contexto o por qué una relación entre dos variables tiene una interpretación causal. Esto último es especialmente importante cuando un investigador espera estimar relaciones causales utilizando datos de observación.

### 3.2.3. Machine Learning

El aprendizaje automático (ML) es el estudio científico de algoritmos y modelos estadísticos que los sistemas informáticos utilizan para realizar una tarea específica sin utilizar instrucciones explícitas, sino que se basan en patrones e inferencia. Es visto como un subconjunto de inteligencia artificial. Los algoritmos de aprendizaje automático crean un modelo matemático basado en datos de muestra, conocidos como "datos de entrenamiento", para hacer predicciones o decisiones sin ser programados explícitamente para realizar la tarea.

El aprendizaje automático está estrechamente relacionado con las estadísticas computacionales, que se centran en hacer predicciones usando computadoras. El estudio de la optimización matemática ofrece métodos, teorías y dominios de aplicación en el campo del aprendizaje automático. La minería de datos es un campo de estudio dentro del aprendizaje automático y se centra en el análisis exploratorio de datos a través del aprendizaje no supervisado. En su aplicación a través de problemas comerciales, el aprendizaje automático también se conoce como análisis predictivo.

Random Forest (RF) es uno de los muchos algoritmos de aprendizaje automático utilizados para el aprendizaje supervisado, esto significa aprender de los datos etiquetados y hacer predicciones basadas en los patrones aprendidos. RF puede usarse tanto para tareas de clasificación como de regresión.

RF se basa en árboles de decisión. En el aprendizaje automático, los árboles de decisión son una técnica para crear modelos predictivos. Se llaman árboles de decisión porque la predicción sigue varias ramas de divisiones de decisión “si ... entonces ...”, similares a las ramas de un árbol. Si imaginamos que comenzamos con una muestra, para la que queremos predecir una clase, comenzaríamos en la parte inferior de un árbol y subiríamos por el tronco hasta llegar a la primera rama separada. En cada rama, se encuentran los umbrales de características que mejor dividen localmente las muestras (restantes). Los árboles de decisión única son muy fáciles de visualizar y comprender porque siguen un método de toma de decisiones que es muy similar a la forma en que los humanos tomamos decisiones: con una cadena de reglas simples. Sin embargo, no son muy robustos, es decir, no se generalizan bien para muestras invisibles. Aquí es donde entran en juego los bosques aleatorios.

## Parte II. Algunos resultados

### 4. Intensidad de Rayos Cósmicos y Actividad Solar

La Figura 1 muestra la anticorrelación bien conocida entre la intensidad de los rayos cósmicos y los números de manchas solares suavizadas. Para un estudio preliminar véase [Sierra-Porta, 2018].

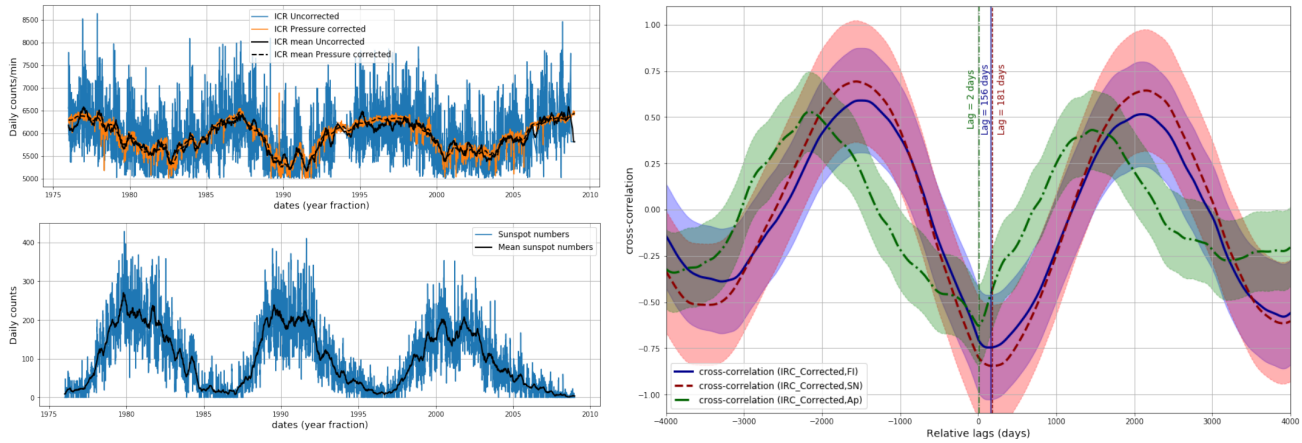


Fig. 1: Izquierda: Intensidad de los rayos cósmicos para el período de años entre 1976 y 2008. El eje horizontal se encuentra en unidades de fracciones de años. La columna vertical representa el valor real de conteos/min para la intensidad de los rayos cósmicos. Derecha: Función de correlación cruzada para cuatro variables consideradas para el período de años entre 1976 y 2008. El eje horizontal se encuentra en unidades de fracciones simétricas de años para el valor de retraso. [Sierra-Porta, 2018].

Para llevar a cabo el cálculo de la figura 1, hemos compilado un conjunto de datos existentes y de código abierto: Datos de intensidad de rayos cósmicos (diarios) disponibles desde 1957 hasta el presente proporcionados por el Monitor de neutrones de Kiel y número total diario de manchas solares (diarias) disponibles entre 1818 a los años actuales de WDC-SILSO, el Observatorio Real de Bélgica, Bruselas (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>). Hemos seleccionado entre el mismo rango de años disponibles para la intensidad de los rayos cósmicos para hacer la validación y correlación correspondiente.



## Referencias

- [Balogh et al., 1999] Balogh, A., Forsyth, R., Lucek, E., Horbury, T., and Smith, E. (1999). Heliospheric magnetic field polarity inversions at high heliographic latitudes. *Geophysical research letters*, 26(6):631–634.
- [Barnett and Preisendorfer, 1987] Barnett, T. and Preisendorfer, R. (1987). Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for united states surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Monthly Weather Review*, 115(9):1825–1850.
- [Dorman and Dorman, 1967] Dorman, I. and Dorman, L. (1967). Solar wind properties obtained from the study of the 11-year cosmic-ray cycle: 1. *Journal of Geophysical Research*, 72(5):1513–1520.
- [Forbush and Van Allen, 1993] Forbush, S. E. and Van Allen, J. A. (1993). *Cosmic rays, the sun, and geomagnetism: the works of Scott E. Forbush*. Amer Geophysical Union.
- [Hotelling, 1933] Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6):417.
- [Hsu et al., 2012] Hsu, D., Kakade, S. M., and Zhang, T. (2012). A spectral algorithm for learning hidden markov models. *Journal of Computer and System Sciences*, 78(5):1460–1480.
- [King and Papitashvili, 2005] King, J. and Papitashvili, N. (2005). Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly wind and ace plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A2).
- [Klein et al., 2009] Klein, K.-L., Steigies, C., and Team, N. (2009). Wwww. nmdb. eu: The real-time neutron monitor database. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 11, page 5633.
- [Mavromichalaki et al., 1998] Mavromichalaki, H., Belehaki, A., and Rafios, X. (1998). Simulated effects at neutron monitor energies: evidence for a 22-year cosmic-ray variation. *Astronomy and Astrophysics*, 330:764–772.
- [Mavromichalaki et al., 2011] Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou, M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V., et al. (2011). Applications and usage of the real-time neutron monitor database. *Advances in Space Research*, 47(12):2210–2222.
- [Mavromichalaki and Petropoulos, 1984] Mavromichalaki, H. and Petropoulos, B. (1984). Time-lag of cosmic-ray intensity. *Astrophysics and space science*, 106(1):61–71.
- [Mishra, 2005] Mishra, M. (2005). Solar activity and cosmic ray intensity variation.
- [Paouris et al., 2012] Paouris, E., Mavromichalaki, H., Belov, A., Gushchina, R., and Yanke, V. (2012). Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum. *Solar Physics*, 280(1):255–271.
- [Papitashvili and King, 2004] Papitashvili, N. and King, J. (2004). Solar wind spatial scales in, and comparisons of, hourly wind and ace imf and plasma data. In *AGU Spring Meeting Abstracts*.
- [Parker, 1992] Parker, E. (1992). The x ray corona, the coronal hole, and the heliosphere. *Journal of Geophysical Research*, 97:4311–4316.
- [Parker, 1965] Parker, E. N. (1965). The passage of energetic charged particles through interplanetary space. *Planetary and Space Science*, 13(1):9–49.
- [Pearson, 1901] Pearson, K. (1901). Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11):559–572.
- [Phillips et al., 1995] Phillips, J., Bame, S., Barnes, A., Barraclough, B., Feldman, W., Goldstein, B., Gosling, J., Hoogeveen, G., McComas, D., Neugebauer, M., et al. (1995). Ulysses solar wind plasma observations from pole to pole. *Geophysical research letters*, 22(23):3301–3304.
- [Popielawska, 1992] Popielawska, B. (1992). Components of the 11-and 22-year variation of cosmic rays. *Planetary and space science*, 40(6):811–827.
- [Popielawska, 1995] Popielawska, B. (1995). Cosmic ray modulation during solar cycle 22: Solar maximum loops at earth and global transients in the heliosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 100(A4):5883–5899.

- [Schwabe, 1844] Schwabe, S. (1844). Sunspot cycle. *Astron Nachr*, 21:233–239.
- [Sierra-Porta, 2018] Sierra-Porta, D. (2018). Cross correlation and time-lag between cosmic ray intensity and solar activity during solar cycles 21, 22 and 23. *Astrophysics and Space Science*, 363(7):137.
- [Smith and Balogh, 2007] Smith, E. and Balogh, A. (2007). Recent ulysses fast latitude scan: Magnetic field observations. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- [Smith et al., 1995] Smith, E., Balogh, A., Burton, M., Erdös, G., and Forsyth, R. (1995). Results of the ulysses fast latitude scan: Magnetic field observations. *Geophysical research letters*, 22(23):3325–3328.
- [Steigies, 2009] Steigies, C. T. (2009). Nmdb: towards a global neutron monitor database. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- [Usoskin et al., 1998] Usoskin, I., Kananen, H., Mursula, K., Tanskanen, P., and Kovaltsov, G. (1998). Correlative study of solar activity and cosmic ray intensity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A5):9567–9574.
- [Van Allen, 2000] Van Allen, J. A. (2000). On the modulation of galactic cosmic ray intensity during solar activity cycles 19, 20, 21, 22 and early 23. *Geophysical research letters*, 27(16):2453–2456.