



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

VARIACIÓN SEMIANUAL EN FLUJOS MAGNETOSFÉRICOS DE PARTÍCULAS

Trabajo de tesis elaborado por el Geof.
Facundo L. Poblet
bajo la Dirección del Dr. **Francisco Azpilicueta**

Trabajo de tesis presentado para optar por el grado de
DOCTOR EN GEOFÍSICA

LA PLATA, ARGENTINA
AÑO 2020

Agradecimientos

Este trabajo de tesis fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas a través de su programa de becas de doctorado, y se llevó a cabo en la Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas perteneciente a la Universidad Nacional de La Plata.

Los responsables directos de que este trabajo de tesis haya podido realizarse son, en primer lugar, el Dr. Francisco Azpilicueta quién acompañó cada una de las etapas de este doctorado tanto profesional como personalmente.

En segundo lugar, todos los integrantes del grupo GESA quienes propiciaron las condiciones para formar un espacio de trabajo agradable.

En tercer lugar, son responsables directos todos y cada uno de los colegas a través del intercambio de ideas e información, que fue clave en el desarrollo de este doctorado.

Agradezco también el soporte de mi familia: papá, mamá y hermano, quienes respaldaron en todo momento la decisión de emprender un doctorado.

Por último, a todos y cada uno de mis amigos y personas que estuvieron presente en algún momento de este doctorado y ya no lo están.

Resumen

La Magnetosfera Terrestre es una región de la Geosfera conocida por la presencia de partículas cargadas que son atrapadas por el Campo Magnético Terrestre (CMT). Estas partículas están sujetas a una gran variedad de procesos físicos y su dinámica es muy diferente dependiendo del tipo de partículas que se estudie.

En este trabajo se estudian dos tipos de partículas que son los electrones en niveles de energía relativista e iones que componen la Corriente Anillo Terrestre. El estudio se centra en la identificación y caracterización de las variaciones regulares, aquellas que se repiten dado un lapso de tiempo. Los períodos de estas variaciones están íntimamente relacionados con la dinámica del Sol, y pueden ser de ~ 11 años (ciclo de manchas solares), ~ 1 y $\sim 1/2$ año asociados al cambio de la geometría del CMT con respecto al Campo Magnético Interplanetario a lo largo de la traslación terrestre, ~ 27 días relacionado con la rotación solar, entre otros. Una de estas variaciones se estudia con mayor profundidad y es la Variación Semianual, caracterizada por máximos de actividad cerca de los Equinoccios y mínimos cerca de los Solsticios.

En el caso de los electrones relativistas se han desarrollado tres tipos de análisis. El primero fue estudiar la Variación Semianual en función de la energía. Para ello, se utilizaron datos de la misión “Van Allen Probes” (RBSP) que consta de dos satélites con la capacidad de medir flujos de electrones en un amplio rango de energías y con gran precisión. Uno de los resultados principales de este estudio es que la Variación Semianual está particularmente concentrada en el rango $\sim 1 - 7$ MeV. El segundo tipo de análisis fue evaluar cuál de las tres teorías principales que intentan explicar la Variación Semianual es la que mas se ajusta a la Variación Semianual en los electrones relativistas. Para ello se utilizaron datos de los satélites “Geostationary Environment Satellites” (GOESs) dado que la base de datos de estos satélites se extiende por varios ciclos solares, lo que permite una mejor aproximación estadística a la modulación semianual de fondo en los datos. Se encuentra que la predicción de la denominada “Teoría Equinoccial” da la mejor correlación con la Variación Semianual observada. El tercer y último estudio a esta población de partículas fue identificar cuáles de los elementos intervinientes en la cadena de procesos físicos que los generan poseen una Variación Semianual. En particular se analizaron ondas magnetosféricas en dos rangos de frecuencia: $[1.7-6.7]$ mHz y $[0.1f_{ce}-f_{ce}]$ (f_{ce} es la frecuencia ciclotrón del electrón) que son conocidas por tener la capacidad de acelerar electrones por medio de distintos procesos. Los resultados muestran una clara Variación Semianual en ambos tipos de ondas.

0. Resumen

Los datos de la misión RBSP también fueron utilizados para analizar la diversidad de flujos de partículas que componen la corriente anillo en búsqueda de una Variación Semianual. Se calculó la energía contenida en los flujos de estas partículas utilizando los siguientes elementos: H^+ , O^+ y He^+ para luego vincularla con las perturbaciones magnéticas en superficie por medio de la relación de “Dessler-Parker-Sckopke”. Los resultados principales de este estudio muestran que la Variación Semianual en la actividad magnética en superficie es replicada en la energía de la corriente anillo.

Originalidad

En el marco de la realización de esta tesis doctoral, se han publicado los siguientes trabajos en revistas internacionales y nacionales con referato:

- Poblet F. L. y F. Azpilicueta, “*27-day variation in solar-terrestrial parameters: Global characteristics and an origin based approach of the signals*”. Advances in Space Research. Año: 2018 vol. 61 p. 2227 - 2490. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.02.016>.
- Poblet F. L. y F. Azpilicueta, “*Variación de ~27 días en la actividad magnética terrestre: características y comparación con otros parámetros*”. GEOACTA. (ISSN: 1852-7744). Año: 2017. Vol. 41(2). p. 17-31.

Copias de estos artículos han sido agregados en el Apéndice 6 de este documento.

Un tercer manuscrito ha sido enviado recientemente a una revista con referato internacional y está siendo evaluado:

- Poblet F. L., Azpilicueta F. y H-L. Lam, “*Semiannual variation of Pc5 ULF waves and relativistic electrons over two solar cycles of observations: comparison with predictions of the classical hypotheses*”. Angeo Discussions. Año: 2019. <https://doi.org/10.5194/angeo-2019-157>.

Por otro lado, varios resultados han sido presentados como contribuciones orales en diversas conferencias de alcance internacional. Las mas significativas son:

- Poblet F. L. y F. Azpilicueta, “*27-day variation in solar-terrestrial parameters: Global characteristics and an origin based approach of the signals*”. “PANGEO II” (II PAN AMERICAN WORKSHOP ON GEOMAGNETISM). Vassouras, Río de Janeiro, Brasil. Noviembre de 2017. DOI: 10.29327/2pangeo.a7
- Poblet F. y F. Azpilicueta, “*The Semiannual Variation in the Van-Allen probes data*”. COLAGE XI - Eleventh Latin American Conference on Space Geophysics. Buenos Aires, Argentina. Abril de 2018.
- Poblet F. L., Azpilicueta F. y H-L. Lam, “*Semiannual variation in Pc5 ULF waves and relativistic electrons: correlations with profiles and phases of the classical hypotheses in two Solar Cycles of observations*”. International Space Weather Initiative Workshop 2019. Trieste, Italia. Mayo de 2019.

0. Originalidad

- Poblet F. L., Azpilicueta F. y B. Nava, “*Variability of ionospheric and ring current parameters: A study focused on their regular characteristics*”. Workshop on Ionospheric Forecasting for GNSS Operations in Developing Countries: Findings and Challenges. Trieste, Italia. Mayo de 2019.

Por último, los estudios desarrollados en esta tesis abren una nueva línea de investigación en el grupo GESA (Geodesia Espacial y Aeronomía) con intenciones de ser continuada. Una tesis de grado en Astronomía en actual desarrollo forma parte de este objetivo:

- Urutti A. “*Evolución temporal de la energía contenida en la corriente anillo*”. Director: Francisco Azpilicueta. Co-Director: Facundo L. Poblet.

Índice general

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Originalidad	vii
1. Introducción	1
2. Marco teórico	5
2.1. El Campo Geomagnético	5
2.1.1. Componentes	5
2.1.2. El Campo Geomagnético Principal	6
2.1.3. Campos magnéticos ionosféricos e inducidos	8
2.1.4. Corrientes y campos magnéticos generados por la Magnetosfera	8
2.1.5. Índice Geomagnético <i>Dst</i>	11
2.2. El Viento Solar y medio Sol-Tierra	14
2.2.1. Interacción Sol-Tierra	16
2.3. Flujo de Partículas, detectores y sistemas de coordenadas	17
2.4. Funciones de Distribución y sus transformaciones	19
2.5. Densidad de energía	20
2.6. Relación de Dessler-Parker-Sckopke	21
2.7. Cinturones de Radiación	22
2.7.1. Movimiento de partículas cargadas atrapadas e invariantes adiabáticos	23
2.7.2. Parámetro L	24
2.8. Sistemas de Coordenadas	25
2.9. Variación Semianual: Definiciones, antecedentes e hipótesis principales	26
2.9.1. Teorías clásicas	28
3. Datos y modelos	37
3.1. Datos geomagnéticos: Amplitudes de Pc5	37
3.2. Datos satelitales	38
3.2.1. Van Allen Probes (RBSP)	38
3.2.2. Geostationary Environment Satellites (GOESs)	46
	ix

3.2.3. Solar, Anomalous, Magnetospheric Particle Explorer (SAMPEX) . . .	47
4. Variación Semianual en electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior	51
4.1. Características en el dominio tiempo-L y dependencia energética	52
4.1.1. Distribución en el tiempo y en L	52
4.1.2. Análisis de superposición en DOY-L y dependencia energética	54
4.1.3. Comparación con patrones de teorías clásicas	61
4.1.4. Variación Semianual en elementos generadores de electrones relativistas	62
4.2. Variación Semianual en la Fluencia de electrones relativistas en órbita geosíncrona	67
4.2.1. Observaciones utilizadas	67
4.2.2. Características generales de las amplitudes en Pc5 y la Fluencia de electrones en los ciclos solares 22 y 23	67
4.2.3. Variación Semianual y comparación con teorías clásicas	69
5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre	77
5.1. Derivación de $J(E, L)$ - Serie diaria de flujos onmidireccionales	77
5.2. Energía contenida (Ec^{H^+})	79
5.3. Variaciones magnéticas estimadas	81
5.4. Contribuciones de O^+ y He^+	82
5.5. Variabilidad de la energía contenida con los canales de energía y correlaciones con el índice Dst	85
5.6. Variación Semianual	86
5.6.1. Correlación con las hipótesis clásicas	87
6. Conclusiones	89
Bibliografía	93
Artículos publicados en el transcurso del doctorado	103

Índice de figuras

2.1. Elementos del campo geomagnético. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018)	6
2.2. Orientación de las diferentes componentes del Campo Magnético dipolar a diferentes latitudes. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018).	7
2.3. Regiones de plasma y sistemas de corrientes en la Magnetosfera. Imagen adaptada de https://tinyurl.com/yxuywrml	9
2.4. Estaciones utilizadas para el cálculo del índice Dst . Se muestra el ecuador geomagnético en línea sólida negra. Adaptado de https://tinyurl.com/uorc42j	12
2.5. Secuencia completa de Dst (valores medios diarios).	13
2.6. Gráfico esquemático del índice Dst identificando las distintas fases de una tormenta geomagnética. Adaptado de (Tsurutani et al., 2006).	14
2.7. (a): Plano meridional que contiene el eje de rotación solar; a la izquierda la corriente generada en la HCS (J) entra a la página y viceversa en el lado derecho. Las líneas sólidas representan las líneas de campo magnético, que entran en el Hemisferio Norte Solar y salen en el Hemisferio Sur. (b) Vista del plano ecuatorial solar mostrando las líneas del IMF (B) que son perpendiculares a las líneas de J . La Tierra orbita en la línea punteada. Figura adaptada de (Rosales et al., 2018)	15
2.8. Figura de John Wilcox (investigador) y Werner Heil (artista) mostrando la HCS inferida por modelos basados en el Vientos Solar y el campo de la Corona. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018).	15
2.9. Estructuras del Viento Solar en la Eclíptica vistas desde el Hemisferio Norte Solar. Figura adaptada de (Prölss, 2004).	17
2.10. Elementos de un detector de partículas ideal. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).	17
2.11. Vectores involucrados en un detector de partículas ideal. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).	18
2.12. Parámetros de las mediciones de flujo en el sistema de coordenadas naturales definido en (Roederer & Zhang, 2014). Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).	18
2.13. Diagrama esquemático de los Cinturones de Radiación con los principales riesgos en cada región. Adaptado de (Baker et al., 2017).	23

2.14. Gráfico esquemático mostrando los principales movimientos de las partículas cargadas atrapadas en las líneas del Campo Magnético Terrestre. Figura adaptada de (Prölss, 2004).	24
2.15. Panel izquierdo: Superposición del índice Dst . Panel derecho: Superposición del índice Dst pero considerando sólo los días con un valor medio diario del índice > -100 nT. La curva roja es la curva suavizada con un promedio móvil de 30 días de longitud en todos los casos.	27
2.16. (a):Índice Dst para 1987. (b): Superposición de valores medios diarios de Dst en un año patrón. 6 años de datos fueron utilizados (1987-1992) (c): Misma referencia que para (b) pero con 10 años de datos (1987-1996). (d): Misma referencia que para (b) y (c) pero con 20 años de datos (1987-2008). Las curvas rojas representan en todos los casos un promedio móvil de la curva negra (curva superpuesta) con una ventana centrada de 30 días de longitud.	28
2.17. Plano XY de la magnetosfera en el sistema GSM visto desde Z positivo. Extraído y adaptado de (Boller & Stolov, 1970).	30
2.18. Representación esquemática en el plano YZ de los sistema GSEq y GSM durante los dos equinoccios (paneles (a) y (c)) y durante los dos solsticios (panel (c)). El vector azul corresponde a la proyección del IMF (considerado saliente del Sol) en ambos sistemas.	31
2.19. ϕ , θ y ψ en el medio Sol-Tierra (ver el texto para mas detalle). Las espirales de Parker caen aproximadamente sobre el plano ecuatorial solar (plano en color gris).	32
2.20. Valor absoluto de los ángulos asociados a la principales teorías de la Variación Semianual. ϕ , θ y ψ están asociados a la hipótesis equinoccial, RM y axial respectivamente.	33
2.21. Valores absolutos suavizados de los ángulos ϕ , θ y ψ asociado con la teoría Equinoccial, RM y axial respectivamente. La curva roja representa el índice Dst superpuesto y suavizado como se indica en las Figuras 2.15 y 2.16.	34
3.1. Trayectorias de las sondas RBSPa (puntos negros) y RBPSb (puntos rojos) para el día 27/01/2016 en el sistema GSE.	39
3.2. Sonda RBSP con los experimentos que contienen la variedad de instrumentos que realizan las mediciones. Figura tomada de https://tinyurl.com/qlngcko	39
3.3. Productos disponibles en un archivo cdf de EMFISIS para un día en particular.	40
3.4. L de McIlwain calculado con OP77Q para los primeros días del año 2013. Los datos provienen de RBSPb-ECT.	42
3.5. Espectograma para el día 04/09/1990 tomado por la misión “Combined Release and Radiation Effects Satellite” (CRRES). Figura adaptada de (Wygant et al., 2013).	43
3.6. Módulo del campo magnético medido por EMFISIS en RBSPb para el día 19/09/2016.	44

3.7. Estabilidad de los canales de energía para las tres especies (H^+ , O^+ y He^+) para ambas sondas durante todo el período de medición utilizado en este trabajo (2013-2018).	45
3.8. Valores de L dipolar entregados por RBSPb-RBSPICE para los primeros días del año 2013.	45
3.9. Tiempos Locales Magnéticos del valor máximo de L de McIlwain alcanzado entre las dos sondas en cada día.	46
3.10. Serie completa de flujo de electrones de SAMPEX-PET en 3.75 MeV en función de L de McIlwain y del tiempo utilizada en este trabajo.	48
4.1. (a) Índice F10.7 promediado mensualmente en unidades de sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). (c), (e) y (g) Series de flujo de electrones de MagEIS hasta Mayo de 2018 medidos por RBSPa. Los canales de energía mostrados son 470, 597, y 909 keV. (b), (d), (f) y (h) Series de flujo de electrones de REPT hasta Mayo de 2018. Las energías son: 1.8, 3.4, 5.2 y 6.3 MeV. L es el parámetro de McIlwain para un ángulo de inclinación con respecto al campo magnético local de 90° de los electrones relativistas.	53
4.2. Mediciones de flujo de electrones representadas en un gráfico día del año (DOY) vs L para el año 2017 y 1.8 MeV. Los datos corresponden a ECT-REPT a bordo de RBSPa. Las líneas negras punteadas están separadas entre ellas por 27.2 días (período sinódico de rotación solar). Se ven claros crecimientos y decrecimientos cada ~ 27 días.	54
4.3. Análisis de superposición en época: (a) para los flujos de REPT en 3.4 MeV y (b) para los flujos promediados en dos niveles de energía (3.75 y 8.25 MeV) del instrumento PET de SAMPEX. Las líneas negras verticales están alineadas con los días de los máximos de actividad según las tres hipótesis clásicas de la Variación Semianual: Axial (línea punteada), Equinoccial (línea a rayas) y el efecto de RM (línea sólida)	55
4.4. Análisis de superposición en época: (a)-(c) para los flujos de electrones de MagEIS en los canales 470, 597 y 909 keV. (d)-(h) para los canales de REPT en 1.8, 2.6, 4.2, 5.2 y 6.3 MeV. Las mismas tres líneas verticales de la Figura 4.3 fueron agregadas en cada panel. Las escalas de colores están en unidades de $\log \# \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$	57
4.5. Curvas IFs calculadas con la Ecuación (4.1) para los flujos de SAMPEX, REPT y MagEIS de RBSPa en los canales de energía utilizados en esta Sección. El panel izquierdo muestra las curvas IFs calculadas con datos de MagEIS y el panel derecho las calculadas con datos de SAMPEX y REPT. Para la curva de SAMPEX, se utilizaron flujos promediados en dos niveles de energía (3.75 y 8.25 MeV) del instrumento PET. Las unidades de las curvas son $\log \# \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$	58

4.6. (a) Desviaciones del promedio anual de los cuatro valores estacionales IFS_i para 5.2 MeV. (b) Diferencia del valor promedio de IFS_i entre los intervalos de los equinoccios EQ1 y EQ2 y los intervalos de los solsticios SL1 y SL2 para cada canal de energía de este trabajo.	60
4.7. Coeficiente de correlación entre los patrones semianuales de los ángulos de las tres teorías clásicas (ver Figura 2.21) y el logaritmo decimal de las curvas que resultan al dejar fijo L en las superficies de la Figura 4.4. Se muestra el caso de cuatro canales de energía de REPT: 1.8, 2.6, 3.4 y 4.2 MeV. La curva de color amarillo, azul y negra corresponden a la correlación con los patrones semianuales de ψ (Axial), θ (hipótesis RM) y ϕ (Equinoccial) respectivamente.	61
4.8. Panel izquierdo: Espectograma tomado de EMFISIS para la sonda RBSPb y el día 19/09/2016. Panel derecho: Espectograma filtrado (ondas coro), eliminando valores fuera del rango de frecuencias $[f_e/10 - f_e]$, dónde f_e es la frecuencia ciclotrón del electrón.	63
4.9. Panel superior: Secuencia temporal con los valores diarios máximos de ondas coro. Estos valores son tomados de los espectogramas filtrados, como se ejemplifica en el día de la Figura 4.8. Panel inferior: Secuencia temporal con los valores diarios máximos de ondas coro menos la curva suavizada de dichos valores, que permite eliminar tendencia de ~ 2 años.	64
4.10. Curva negra: Superposición en un año de la secuencia de ondas coro (curva del panel inferior en la Figura 4.9). Curva roja: Curva negra suavizada con un promedio móvil utilizando una ventana de 30 días de longitud.	65
4.11. Serie temporal para una población de electrones fuente (15 keV), semilla (246 keV) y relativista (3.4 MeV) para 2013-2018.	66
4.12. (a): Secuencia de ondas coro superpuesta y suavizada. (b): Superposición en un año de los flujos de HOPE en 15 keV. (c): Superposición en un año de los flujos de REPT en 3.4 MeV. (d): Superposición en un año de los flujos de REPT en 246 keV. Los datos de los cuatro paneles corresponden a RBSPb.	66
4.13. Panel superior: Valores diarios de amplitud de Pc5 (puntos negros). La línea negra sólida representa el promedio móvil con una ventana centrada de 365 días de longitud. Panel inferior: Análogo al panel superior pero para los valores diarios de Fluencia. La línea naranja representa la progresión del ciclo solar de manchas (curva suavizada).	68
4.14. Fluencia (curva roja) y amplitudes en Pc5 (curva verde) para los años 1996 (panel superior) y 2007 (panel inferior).	69
4.15. Superposición anual del logaritmo de Pc5 (panel izquierdo) y Fluencia (panel derecho). La mediana es representada como una curva negra y los cuartiles como el límite superior e inferior de la región gris. La curva verde y roja corresponden a la curva negra suavizada para Pc5 y Fluencia respectivamente ($Pc5_{SAV}$ and Fl_{SAV}).	70

4.16. Valores absolutos suavizados (perfiles semianuales) de los ángulos asociados con la Teoría Equinoccial, de RM y Axial respectivamente. También se muestran las curvas Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$ a intervalos de tres días. 71

4.17. Superposición anual del logaritmo de las amplitudes en Pc5 (panel izquierdo) y Fluencia (panel derecho). La mediana y los cuartiles son representados como una curva negra, el límite superior e inferior en la figura respectivamente. La curva verde y roja son los ajustes de la mediana usando $f(t)$ de la Ecuación 4.3. Los parámetros del ajuste de la Fluencia son $(A^0, A^a, \alpha^a, A^{sa}, \alpha^{sa}) = (7.09, -0.06, 1.48, -0.23, 1.72)$ y los del ajuste de la amplitud en Pc5 $(A^0, A^a, \alpha^a, A^{sa}, \alpha^{sa}) = (2, 0.04, 1.28, -0.12, 1.61)$ 73

5.1. Mediciones de flujo omnidireccional en función de L dipolar para RBSPa (puntos negros) y RBSPb (cruces azules) en el día 20/10/2016. Los tres paneles corresponden a tres niveles de energía distintos: ~ 67 keV (panel izquierdo), ~ 148 keV (panel central) y ~ 400 keV (panel derecho). Las curvas rojas indican la curva promediada llamada $J(E, L)$ (ver texto). 78

5.2. Distribución en L de $J(E, L)$ para los tres canales de energía de la Figura 5.1 a lo largo de todo el período de medición utilizado. 79

5.3. Panel superior: ΔEc^{H^+} para tres niveles de energía: $E \sim 67$ keV (curva azul), $E \sim 148$ keV (curva roja) y $E \sim 400$ keV (curva verde). La curva negra es la energía contenida total Ec^{H^+} . Panel inferior: Igual al panel superior pero sólo para el año 2016. 81

5.4. Panel superior: Perturbación magnética estimada ΔB^{H^+} (curva azul) para los flujos de H^+ durante todo el período de medición utilizado (2013-2018). Panel inferior: ΔB de H^+ sólo para 2015. En ambos paneles se ha agregado el índice Dst en los años correspondientes. 82

5.5. Distribución en L de $J(E, L)$ para la especie O^+ en tres canales de energía: ~ 238 keV, ~ 400 keV y ~ 671 keV a lo largo de todo el período de medición utilizado. 83

5.6. Distribución en L de $J(E, L)$ para la especie He^+ en tres canales de energía: ~ 110 keV, ~ 184 keV y ~ 309 keV a lo largo de todo el período de medición utilizado. 84

5.7. Variación magnética estimada ΔB^{He^+} para los flujos de He^+ (curva verde) y ΔB^{O^+} para los flujos de O^+ (curva roja) durante todo el período de medición utilizado (2013-2018). 84

5.8. Coeficientes de correlación resultantes de correlacionar el módulo del índice Dst con la energía contenida por la Corriente Anillo (ΔEc) por las tres especies principales (H^+ , O^+ y He^+) para distintos canales de energía. 86

5.9. Superposición en un año patrón de la serie de valores diarios de $-\Delta B$ (curva azul) y de $-Dst$ en el período 2013-2018. Las curvas fueron suavizadas con un promedio móvil centrado de 30 días de longitud. 87

5.10. Superposición en un año patrón de la serie de valores diarios de $-\Delta B$ (curva azul) y de $-Dst$ en el período 2014-2018. Las curvas fueron suavizadas con un promedio móvil centrado de 30 días de longitud.	88
5.11. Valores absolutos suavizados (perfiles semianuales) de los ángulos asociados a la teoría Equinoccial, de RM y Axial respectivamente. También se muestran las curvas superpuestas y suavizadas de $-\Delta B$ y $-Dst$ en el período de medición de RBSP (2013-2018).	88

Índice de tablas

2.1. Fechas de máximos y mínimos para $ \phi $, $ \theta $ y $ \psi $ suavizados. Notar que para ϕ los máximos en realidad son mínimos y viceversa. Sin embargo, la notación “máximo” y “mínimo” se refiere en este contexto a los máximos y mínimos en la actividad generada por la Variación Semianual, por eso se conserva la notación.	33
3.1. Coordenadas de los observatorios de la red CANMOS utilizados para este estudio.	38
3.2. Datos satelitales para los estudios de esta sección.	47
3.3. Síntesis de todas las observaciones utilizadas en este trabajo.	49
4.1. Intervalos que comprenden aproximadamente tres meses de valores diarios.	59
4.2. Coeficiente de correlación entre los perfiles semianuales de los ángulos (ϕ , θ y ψ) y $Pc5_{SAV}/Fl_{SAV}$	71
4.3. Coeficientes de correlación de las dependencias funcionales de los ángulos $S(\phi)/Ak(\theta)$ con $Pc5_{SAV}/Fl_{SAV}$	72
4.4. Fechas de máximos y mínimos para las curvas de $ \phi $, $ \theta $ y $ \psi $ y también de los ajustes ($f(t)$).	75
5.1. Coeficientes de correlación de Dst con ΔB , ΔB^{H^+} , ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+}	85
5.2. Coeficientes de correlación entre los perfiles semianuales de los tres ángulos de las teorías clásicas con la serie de $-\Delta B$ y $-Dst$ superpuestos (y suavizados) en el período 2014-2018.	88

Capítulo 1

Introducción

La Magnetosfera Terrestre es el lugar físico en el que tiene lugar la interacción del Viento Solar supersónico con el campo magnético dipolar de la Tierra. Esta interacción es sorprendentemente complicada puesto que están involucradas escalas espaciales en casi cinco órdenes de magnitud (Borovsky & Valdivia, 2018). Lo mismo ocurre con las escalas temporales que varían, por ejemplo, desde los segundos para las pulsaciones aurorales (Yamamoto, 1988), los minutos para la reacción de la Magnetosfera a cambios en el Viento Solar (Boudouridis et al., 2011), días para la intensificación del Cinturón de Radiación de electrones (Balikhin et al., 2011), hasta años que le toma en decaer a los elementos más estables del Cinturón de Radiación Interno.

En la Magnetosfera coexisten múltiples subsistemas de partículas con distintas propiedades. Borovsky & Valdivia (2018) analizaron la Magnetosfera como un sistema completo regulado por el Viento Solar, en el que identificaron catorce subsistemas que interactúan entre sí, cada uno de los cuales formado por una población de partículas distinta. Doce subsistemas corresponden a partículas ionizadas y sólo dos de ellos a partículas neutras. Este trabajo se centra en el estudio de dos de estos subsistemas, que son los electrones relativistas (energías en MeV) del Cinturón de Radiación externo y las poblaciones de partículas que componen la Corriente Anillo Terrestre. El objetivo es identificar y caracterizar una variación anual, de baja frecuencia, conocida como Variación Semianual.

Para ello, se llevaron a cabo distintos tipos de análisis. En el caso de los electrones relativistas, el análisis fue observacional y estadístico, evaluando una amplia variedad de elementos involucrados en la aceleración de los electrones a energías relativistas. En el caso de los elementos de la Corriente Anillo, se implementó un algoritmo que calcula variaciones magnéticas estimadas a partir de flujos de iones, por medio de la relación conocida como relación de Dessler-Parker-Sckopke. Estas variaciones pudieron luego ser comparadas con variaciones magnéticas medidas.

La Variación Semianual está caracterizada por presentar máximos de actividad cerca de los Equinoccios y mínimos cercanos a los Solsticios y es reconocida en la mayor parte de las variables utilizadas para medir la actividad electromagnética en la Geósfera. En el caso de este trabajo, estas variables fueron las mediciones de las sondas “Van Allen Probes” (RBSP),

1. Introducción

de varios satélites de la misión “Geostationary Environment Satellites” (GOESs), de la misión “Solar, Anomalous, Magnetospheric Particle Explorer” (SAMPEX) y de observatorios geomagnéticos permanentes de la red “Canadian Magnetic Observatory System” (CANMOS). Debido a que la Variación Semianual puede detectarse en un amplio espectro de mediciones, las teorías que tratan de explicarla consideran procesos de intercambio de energía entre el Viento Solar y la Magnetosfera que afectan de manera completa a esta última. En la bibliografía específica suelen distinguirse tres hipótesis o teorías que son la Teoría Equinoccial (Cliver et al., 2000), la Teoría de Russell & McPherron (Russell & McPherron, 1973) y la Teoría Axial (Cortie, 1912), aunque esta última haya sido ampliamente descartada por gran parte de los trabajos previos. Las tres hipótesis serán debidamente explicadas en el documento.

El estudio de la Variación Semianual en los electrones relativistas del Cinturón de Van Allen externo ha sido llevada a cabo principalmente con datos de la misión SAMPEX, ya que esta misión fue capaz de medir por mas de un Ciclo Solar los flujos de electrones en función de un amplio rango de distancias radiales magnetosféricas (Baker et al., 1993). Hay tres trabajos que se destacan en este tema y son (Baker et al., 1999; Li et al., 2001; Kanekal et al., 2010). Baker et al. (1999) encontró, haciendo promedios trimestrales de electrones en >2 MeV con los datos centrados en los días de los Equinoccios, que los niveles equinociales son tres veces mas grandes que los niveles de los solsticios. Además, en ese artículo se utilizan datos de otras sondas que avalan estos resultados. Baker et al. propusieron que una combinación de la hipótesis de Russell & McPherron y la Equinoccial podrían explicar esta variación en los electrones.

Por otro lado, Li et al. (2001) utilizaron también datos de SAMPEX para derivar la Variación Semianual, centrándose exclusivamente en L fijos¹. Estos autores compararon la Variación Semianual en los flujos en $L \simeq 5$ (el corazón del Cinturón Exterior) con la correspondiente variación en el índice Dst encontrando buena correlación. También encontraron que la Variación Semianual en $L \simeq 6.6$ (órbita geosíncrona) se correlaciona bien con la correspondiente variación en la velocidad del Viento Solar.

En el artículo de Kanekal et al. (2010) analizaron patrones semianuales en un gráfico compuesto en el tiempo en función de L utilizando la serie completa de SAMPEX y encuentran que el máximo esperado cerca del primer Equinoccio del año aparece retrasado por mas de 30 días. El máximo esperado cerca del segundo Equinoccio en cambio, se alinea mejor con la predicción de Russell & McPherron.

El estudio de la dinámica de los electrones relativistas en el Cinturón de Van Allen externo tiene gran relevancia para el Clima Espacial, ya que los flujos de estas partículas son conocidos por causar eventos de carga interna en los satélites, que provocan anomalías operacionales en los mismos. Cuantificar la Variación Semianual implica determinar cuánto mayor son, en promedio, los flujos de electrones relativistas cerca de los Equinoccios comparados con los valores que toman cerca de los Solsticios. Esto permite a su vez cuantificar la probabilidad de sufrir anomalías operacionales en distintas épocas del año.

En el caso de la población de partículas que componen la Corriente Anillo Terrestre,

¹El parámetro L será desarrollado en la Sección 2.7.2 de este documento

numerosos trabajos han demostrado que está compuesta principalmente de iones H^+ en el rango de energías entre las decenas y varios cientos de keV, con una proporción menor de iones O^+ y He^+ . Esta corriente ha sido estudiada clásicamente a través de proxies², utilizando observaciones de parámetros geomagnéticos medidos en superficie y no a través de mediciones in-situ de sus constituyentes. Algunas de estas variables son la componente H del Campo Geomagnético en latitudes medias o el índice magnético Dst . Este trabajo pretendió recorrer el camino inverso, es decir, estudiar si la Variación Semianual que se reconoce en la actividad magnética hace más de medio siglo (Cliver et al., 2000), puede identificarse en las mediciones directas de los flujos de las especies que componen la Corriente Anillo. Hasta el momento, no es posible encontrar reportes que indiquen la presencia de una Variación Semianual en estas especies, lo que destaca lo novedoso del presente estudio.

La tesis está estructurada en seis capítulos, teniendo en cuenta el presente capítulo en el que se desarrolla la Introducción.

El Capítulo 2 es el marco teórico y contiene los conceptos fundamentales en los que se enmarcan los distintos análisis del trabajo. Se describen el Campo Magnético Terrestre, el Medio Sol-Tierra y los Cinturones de Radiación, entre otros. También se desarrollan las principales teorías de la Variación Semianual y los estudios previos más relevantes.

El Capítulo 3 presenta las distintas fuentes de datos y modelos utilizados. Los datos provienen de tres misiones distintas y de observaciones geomagnéticas medidas en superficie. Se describen en detalle los períodos de falta de datos y cómo se combinan las mediciones para obtener la serie temporal final a procesar.

En el Capítulo 5.1 se desarrolla el análisis de los electrones relativistas que está dividido en dos partes según la misión utilizada para obtener los datos de electrones. Desde la Sección 4.1 hasta la Sección 4.1.4 los análisis se hacen sobre el procesamiento de datos de RBSP y SAMPEX. A partir de la Sección 4.2 en adelante el análisis es sobre el procesamiento de datos de Fluencia proveniente de distintas misiones GOES.

El Capítulo 5 presenta el análisis de los constituyentes de la Corriente Anillo (iones de H^+ , He^+ y O^+). Una comparación directa con el índice Dst es llevada a cabo en todo el capítulo.

Por último, el Capítulo 6 enumera y describe todas las conclusiones de este trabajo de tesis.

²En este contexto, se utiliza el término “proxy” para referir a un parámetro que posee esencialmente la misma variabilidad que una variable que se desea medir y es difícil de hacerlo. De este modo, se puede usar el proxy para representar variaciones en la cantidad desconocida.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. El Campo Geomagnético

Los magnetómetros de los observatorios geomagnéticos en superficie registran la superposición de campos magnéticos de distintas fuentes, que pueden ser agrupadas según su origen en dos grupos: de origen interno y externo. Las fuentes de origen interno son: el Campo Geomagnético Principal generado en el núcleo externo líquido que comprende la mayor parte del campo medido y alcanza valores de ~ 25000 nT. Los campos litosféricos y de la corteza terrestre debido a los minerales magnéticos de estas capas, los campos por corrientes de Faraday inducidas en el manto y corteza y los campos debidos a las mareas oceánicas que son importantes en estaciones ubicadas en las costas y que se debe a la conductividad del flujo oceánico. Estas últimas fuentes internas que no corresponden al Campo Geomagnético Principal pueden alcanzar valores en el orden de las decenas de nanoteslas.

Por otro lado, las fuentes de origen externo son: el campo generado por las corrientes de dínamo ionosféricas ($\sim 20-80$ nT) y el campo debido a diferentes corrientes magnetosféricas (pueden alcanzar los ~ 800 nT en épocas de tormenta geomagnética). El campo principal y los campos de la corteza no contribuyen a la actividad magnética debido a que permanecen constantes en escalas temporales menores al día (ver por ejemplo (Pedatella et al., 2011)).

2.1.1. Componentes

Las componentes o elementos del campo magnético total en superficie pueden medirse en coordenadas cartesianas locales, coordenadas esféricas y cilíndricas (Ver Figura 2.1 y 2.2). Las componentes cartesianas son X , Y y Z , donde X positivo apunta al norte geográfico, Y positivo está dirigido al este y Z positivo completa la terna ortogonal, apuntando hacia el interior terrestre. Las componentes cilíndricas son H , D y Z , donde H es la componente horizontal de intensidad del campo que resulta de $\sqrt{X^2 + Y^2}$, Z es la misma de la representación en coordenadas cartesianas y D es la declinación magnética, o el ángulo horizontal que se mide de Norte a Sur y positivo hacia el este. Las componentes en coordenadas esféricas son F , D e I , donde F es la intensidad total del campo, que resulta de $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2}$, D la declinación e I la inclinación, o el ángulo entre F y H , positivo si F apunta hacia el

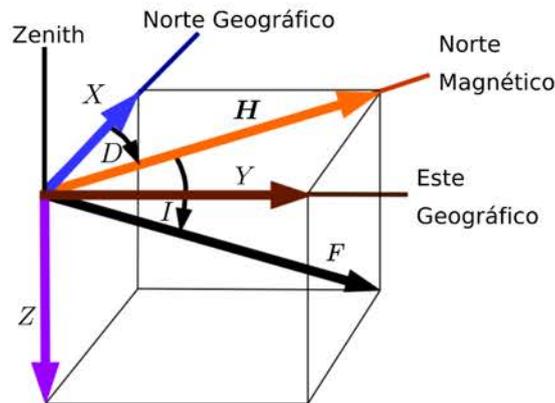


Figura 2.1. Elementos del campo geomagnético. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018)

interior terrestre.

2.1.2. El Campo Geomagnético Principal

El Campo Geomagnético Principal tiene origen en los procesos de convección del fluido en el núcleo externo terrestre que mueven el material eléctricamente conductor y generan un mecanismo de dínamo. La convección se provoca principalmente por la energía gravitacional generada por la migración de elementos livianos hacia afuera y el crecimiento del núcleo interno por el enfriamiento de componentes más pesadas (Campbell, 2003). Este campo es aproximadamente constante en escalas diarias, pero su variación puede ser apreciable a escala anual.

El Campo Geomagnético Principal posee una parte dipolar y otra no dipolar. La aproximación dipolar funciona bien a alturas magnetosféricas, ionosféricas e incluso en la superficie para algunos propósitos. El mejor ajuste para el campo dipolar centrado lo ubica inclinado 9.7° con respecto al eje de rotación terrestre, como se puede ver en la Figura 2.2. Este ángulo no permanece fijo y en la actualidad se está reduciendo (ver (Thébault et al., 2015)).

La geometría dipolar hace que la magnitud del campo geomagnético sobre la superficie de la Tierra no sea uniforme. En general se observan valores bajos de intensidad total del campo en regiones ecuatoriales y más altos en regiones polares. De la misma manera, los ángulos de declinación e inclinación tampoco son uniformes. La declinación es mayor en las regiones cercanas a los polos magnéticos (donde las líneas de campo son perpendiculares a la superficie). Notar que la componente H es máxima en las regiones ecuatoriales comprendiendo casi la totalidad del vector medido en estas regiones (ver Figura 2.2). Este hecho es de utilidad al estudiar los flujos magnetosféricos de partículas en latitudes bajas, como se realizará en este trabajo.

Una aproximación mejor a la del dipolo centrado es la del dipolo excéntrico, que consiste en un dipolo inclinado, pero desplazado unos 576.8 km del centro de la Tierra (Fraser-Smith, 1987). Desde 1950, la aproximación del dipolo excéntrico se ha estado alejando del dipolo

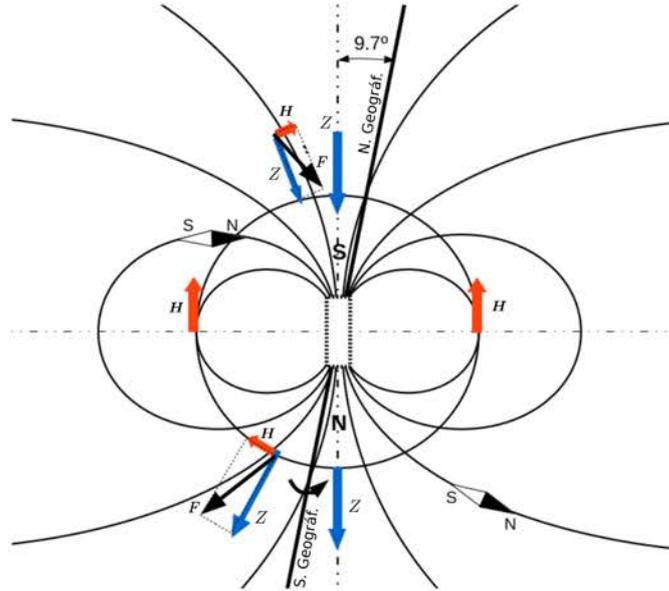


Figura 2.2. Orientación de las diferentes componentes del Campo Magnético dipolar a diferentes latitudes. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018).

centrado a una velocidad constante de ~ 2.5 km/año (Laundal & Richmond, 2016).

La representación mas precisa del Campo Magnético de la Tierra se obtiene cuando el potencial escalar magnético es expandido en una serie de armónicos esféricos de la forma

$$V(R, \theta, \phi, t) = R_T \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_T}{R} \right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos m\phi + h_n^m(t) \sin m\phi] P_n^m(\cos \theta) \quad (2.1)$$

donde R , θ y ϕ son las coordenadas geográficas y R aumenta en la dirección radial. θ es la colatitud medida desde el polo norte geográfico y ϕ la longitud, que es positiva hacia el este. $R_T = 6371.2$ es el radio medio terrestre. En la Ecuación 2.1 $P_n^m(\cos \theta)$ son los polinomios asociados de legendre de grado n y orden m , y $g_n^m(t)$ y $h_n^m(t)$ son los coeficientes de la serie que dependen del tiempo y se miden en nanoteslas (nT). En la práctica, estos coeficientes se determinan con el ajuste del potencial de la Ecuación 2.1 con mediciones de observatorios geomagnéticos, relevamientos magnéticos y datos de satélites de baja órbita.

Desde 1965, un equipo internacional de científicos bajo el auspicio de la “Association of Geomagnetism and Aeronomy” (IAGA) se ha ocupado de producir y mantener un modelo matemático que describe el Campo Magnético Terrestre (CMT) a gran escala y su variación secular desde 1900 hasta la actualidad, denominado “International Geomagnetic Reference Field” (IGRF). Este modelo entrega el valor de $\mathbf{B}(\mathbf{R}, \theta, \phi, t)$, calculado con la Ecuación 2.1 hasta $n = 13$.

La versión IGRF-12 entrega los coeficientes g_n^m y h_n^m cada 5 años y es válida para el período 1900.0-2020.0. El truncamiento en $n = 13$ del desarrollo de la Ecuación 2.1 se realiza para no considerar fuentes que se observan en grados altos como las fuentes corticales.

2. Marco teórico

IGRF es ampliamente utilizado en la comunidad para una gran variedad de estudios como estudios del campo del núcleo externo, para estudios de clima espacial, en la elaboración de índices geomagnéticos, etc. Este modelo es revisado cada 5 años y la versión actual así como versiones previas pueden encontrarse en <https://tinyurl.com/y7mh6bww>¹.

Otro modelo que suele ser utilizado en la comunidad es el “World Magnetic Model”, que es el modelo adoptado por el departamento de defensa estadounidense. Este modelo también es actualizado cada cinco años, y la última versión es el WW2020 (<https://tinyurl.com/uwdzrbb>).

2.1.3. Campos magnéticos ionosféricos e inducidos

En la capa E de la ionosfera (entre 85 y 200 km de altitud aproximadamente), la conjunción entre distintos factores producen corrientes en forma de vórtices, que se manifiestan como patrones diarios suaves y regulares en el campo magnético registrado en superficie (conocidas como “Solar Quiet” (Sq)). Estos factores son la radiación solar, la acción de fuerzas gravitacionales, los vientos y la alta conductividad de la capa E.

Las variaciones magnéticas debido a corrientes inducidas en la corteza, en cambio, se manifiestan como una señal ruidosa de gran amplitud. Estas corrientes se producen en la corteza y manto superior y su intensidad es aproximadamente una tercera parte de las corrientes de dínamo ionosféricas (Langel & Estes, 1985).

2.1.4. Corrientes y campos magnéticos generados por la Magnetosfera

Una magnetosfera es una cavidad dentro del medio interplanetario que resulta de la interacción entre el Campo Magnético Interplanetario (del Viento Solar) y el campo magnético intrínseco o la atmósfera superior ionizada de un cuerpo planetario en particular. En el caso de la Tierra, que posee un campo magnético cuasi-dipolar con atmósfera e ionosfera densas, el tamaño de la magnetosfera se determina por el balance de presión entre la presión dinámica del Viento Solar y la presión magnetosférica (ver (Pulkkinen, 2007)). La región en dónde las presiones se equilibran determina el borde de la magnetosfera y se conoce como Magnetopausa, que en condiciones típicas del Viento Solar se extiende hasta los $10R_T$ en el lado diurno, pero en condiciones perturbadas se puede comprimir hasta los $6.6R_T$ aproximadamente. El campo magnético tiene forma de cola en el lado nocturno de la Tierra y se extiende a más de $60 R_T$ hacia la región conocida como “Magnetocola”.

El plasma contenido por la Magnetosfera está compuesto principalmente de electrones y protones que provienen del Viento Solar y de la Ionosfera terrestre. También contiene otros elementos como O^+ , He^+ y cantidades mucho menores de He^{++} provenientes del Sol (Baumjohann & Nakamura, 2007). Este plasma puede ser agrupado en distintas regiones según sus densidades y temperaturas, dentro de las cuales se destacan (Ver Figura 2.3):

¹En este documento se utilizará el servicio <https://tinyurl.com/> para referenciar sitios web. Este servicio permite acortar la cantidad de caracteres utilizados de las direcciones web.

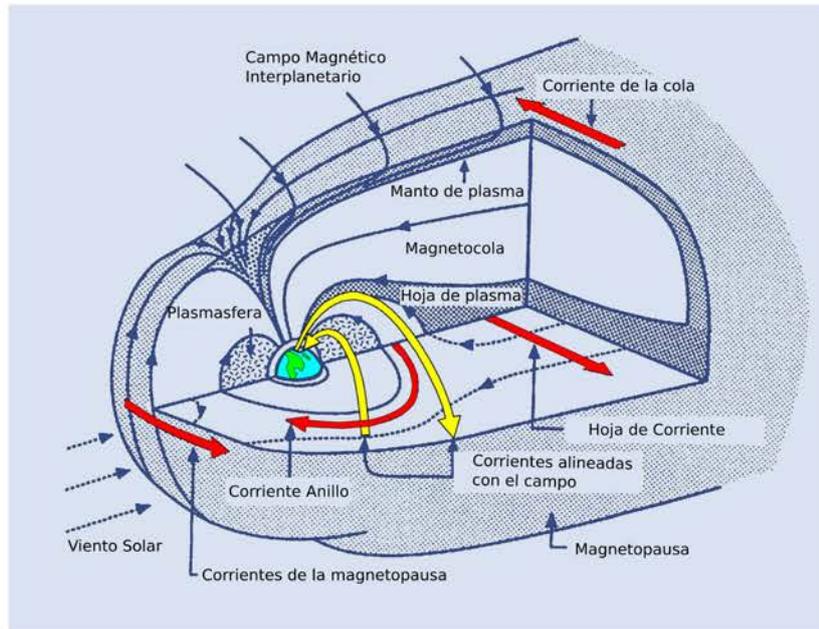


Figura 2.3. Regiones de plasma y sistemas de corrientes en la Magnetosfera. Imagen adaptada de <https://tinyurl.com/yxuywrml>

1. El manto de plasma, ubicado en la parte interna de la magnetopausa que fluye hacia el lado nocturno,
2. la hoja de plasma, que separa el lóbulo norte del lóbulo sur en la cola de la Magnetosfera,
3. la Plasmasfera y los Cinturones de Van Allen.

Las partículas de estos reservorios de plasma son fuente de distintas corrientes magnetosféricas. Generalmente, los autores suelen distinguir las siguientes (Tsyganenko, 2013; Pulkkinen, 2007):

1. Dos sistemas de corriente anillo: corriente anillo total (axisimétrica) y corriente anillo parcial,
2. las corrientes en la Magnetocola,
3. un sistema de corrientes verticales alineadas con el campo magnético local que conectan la Ionosfera con la Magnetosfera llamado “corrientes de Birkeland”,
4. corrientes de borde en la Magnetopausa denominadas “corrientes de Chapman-Ferraro”.

La Corriente Anillo puede extenderse entre los 1.3 y 10 R_T con un campo magnético típico del orden de los pocos cientos de nanoteslas. Esta corriente es el resultado del drift hacia el este(oeste) de los electrones(protones) atrapados en los cinturones de Van Allen (ver Sección 2.7), generando una corriente neta resultante que circula hacia el oeste. En tiempos de calma, la corriente hacia el este es de $\sim 2 \text{ nA m}^2$ y hacia el oeste de $\sim 1\text{-}4 \text{ nA m}^2$, pero en épocas de tormenta geomagnética la resultante puede llegar a los $\sim 50 \text{ nA m}^2$.

La corriente anillo simétrica requiere de varias horas para formarse y decae en uno o dos días (Tsyganenko, 2005). Por otro lado, la parte asimétrica de la corriente anillo conocida como corriente anillo parcial, también provoca una disminución en el campo magnético en la región ecuatorial pero localizada en el sector atardecer/noche, con picos entre las 18:00 y 20:00 hora local. Este exceso de corriente fluyendo hacia el oeste en la noche sugiere la existencia de corrientes alineadas con el campo, que entran a la tierra en el sector del atardecer y salen de la tierra en el sector de la mañana. Esta corriente es importante en épocas de tormenta geomagnética y su intensidad contribuye a los $\sim 50 \text{ nAm}^2$ en épocas de tormenta mencionados anteriormente.

La mayoría del plasma en la magnetocola está concentrado alrededor de un plano aproximadamente ecuatorial de unos $5\text{-}10 R_T$ de extensión que se denomina “Hoja de Plasma”. Este plasma tiene una densidad de electrones y temperatura media de 0.5 cm^{-3} y $5 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ respectivamente e induce campos magnéticos que alcanzan los $\sim 10 \text{ nT}$ de intensidad (Baumjohann & Nakamura, 2007). Al norte y sur de la Hoja de Plasma, se encuentran los denominados lóbulos. Mas allá de los $20R_T$, en la dirección contraria al Sol, los lóbulos tienen campos magnéticos prácticamente anti-paralelos, casi constantes en intensidad de $\sim 20 \text{ nT}$ (Pulkkinen, 2007). En el plano que los separa, se forma una corriente denominada “Hoja de Corriente” que fluye hacia el oeste, luego se separa hacia el norte y el sur y se cierra en la magnetopausa (ver Figura 2.3). Durante la fase principal de una tormenta geomagnética (Ver Sección 2.1.5) esta corriente se desplaza radialmente en dirección a la Tierra hasta concentrar el pico en $4\text{-}6 R_T$. Un valor típico de densidad de Corriente para este sistema es 30 mA m^{-2} .

Físicamente, la Corriente Anillo y la corriente de la Magnetocola mas distante forman un único sistema de corrientes. La diferencia es que la Corriente Anillo (simétrica) circula alrededor de la Tierra y se cierra completamente dentro de la Magnetosfera, mientras que las corrientes de la cola fluyen sólo en el lado nocturno y se cierran en la Magnetopausa. Las corrientes de Birkeland o corrientes alineadas con el campo son ocasionadas principalmente por electrones y son responsables del intercambio de energía y momento entre tres sistemas: la Magnetopausa, la Magnetosfera interna y la Ionosfera (Coxon et al., 2014). En la Ionosfera auroral, las corrientes de Birkeland forman dos anillos concéntricos y se dividen en Región 1 y Región 2.

Finalmente, las corrientes que fluyen en la Magnetopausa son denominadas corrientes de Chapman-Ferraro y alcanzan valores de $\sim 20 \text{ mA m}^{-2}$. Estas corrientes son causadas por el desvío de partículas cargadas en la Magnetopausa. Partículas con cargas positivas y negativas que llegan al borde de la Magnetosfera desde el Viento Solar se desvían en direcciones opuestas, normales al campo magnético local, dando lugar a una corriente neta dirigida hacia el este en la región ecuatorial, como muestra la Figura 2.3.

Corriente Anillo: Composición y rangos de energía

Si bien todas las poblaciones de partículas en la magnetosfera mas interna contribuyen a la Corriente Anillo, solo los iones en el rango de energías que va de los keV a cientos de keV

contribuyen significativamente (Daglis et al., 1999). El aporte de los electrones es despreciable debido a que su densidad de energía es muy pequeña comparada con la de los iones.

En cuanto a los rangos de energía, uno de los primeros reportes en establecer un valor fue publicado por Frank (1967), quién sugirió que los iones (presumiblemente protones) de ~ 50 keV eran la principal fuente. La composición y los rangos de energía detallados fueron determinados en la década del 80' con los datos provenientes de la misión AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorer) (Krimigis et al., 1982). Por ejemplo, Williams (1981) estimó que el $\sim 90\%$ de las componentes de la Corriente Anillo se encuentra en el rango 15-250 keV. Por otro lado, Krimigis et al. (1985) estableció el límite inferior en ~ 50 keV con el pico ubicado en ~ 300 -500 keV para tiempos calmos y de tormenta. Los límites energéticos en tiempos de tormenta fueron estudiados también por Korth et al. (2000) quien concluyó que los iones de energías mas bajas ~ 5 -28 keV contribuyen significativamente a la densidad de energía durante la fase principal de una tormenta geomagnética.

En cuánto a la composición, la especie dominante en la densidad de energía de la Corriente Anillo es H^+ para tiempos calmos y perturbados. Las otras especies que pueden contribuir en tiempos de tormenta son O^+ , He^+ y de manera secundaria He^{++} (Gloeckler et al., 1985; Hamilton et al., 1988; Greenspan & Hamilton, 2000; Zhao et al., 2015). O^+ representa un $\sim 6\%$ de la densidad de energía total durante tiempos de calma y puede alcanzar un 50% durante tormentas intensas.

El origen de esta última especie es esencialmente la Ionosfera terrestre en latitudes altas.

Para H^+ en cambio, el origen no es tan claro. Gloeckler et al. (1985) estimaron que para tiempos calmos el $\sim 35\%$ de los protones de la corriente anillo mas distante ($L = 5-7$) y el $\sim 75\%$ de los protones mas cercanos a la Tierra ($L = 3-5$) son de origen ionosférico. En cambio, en tiempos de tormenta el $\sim 30\%$ de los protones en $L = 5-7$ y el $\sim 65\%$ en $L = 3-5$ son de origen ionosférico. Los iones de He^{++} que tienen origen en el Viento Solar contribuyen como máximo en un 4% a la densidad de energía.

Las fuentes directas de las partículas de la Corriente Anillo son la Hoja de corriente en la magnetocola y la Ionosfera Terrestre. Dado que las partículas de la Hoja de Corriente se cree que tienen origen ionosférico y también en el Viento Solar, las fuentes últimas son la Ionosfera y el Viento Solar. La importancia relativa de estas dos fuentes es objeto de estudio en la actualidad (Zhao et al., 2015). Determinar la abundancia de O^+ parece ser la solución al problema ya que proviene exclusivamente de la Ionosfera.

2.1.5. Índice Geomagnético Dst

El índice "Disturbance storm time" (Dst) fue propuesto por Sugiura (1964) para medir variaciones magnéticas como respuesta a una intensificación de la Corriente Anillo. Se calcula usando datos de los observatorios Hermanus (HER), Honolulu (HON), Kakioka (KAK) y San Juan (SJG) (ver Figura 2.4), los cuatro ubicados en latitudes medias ya que en estas regiones las perturbaciones tanto en las componentes horizontales como en las verticales del campo geomagnético están dominadas por la Corriente Anillo.

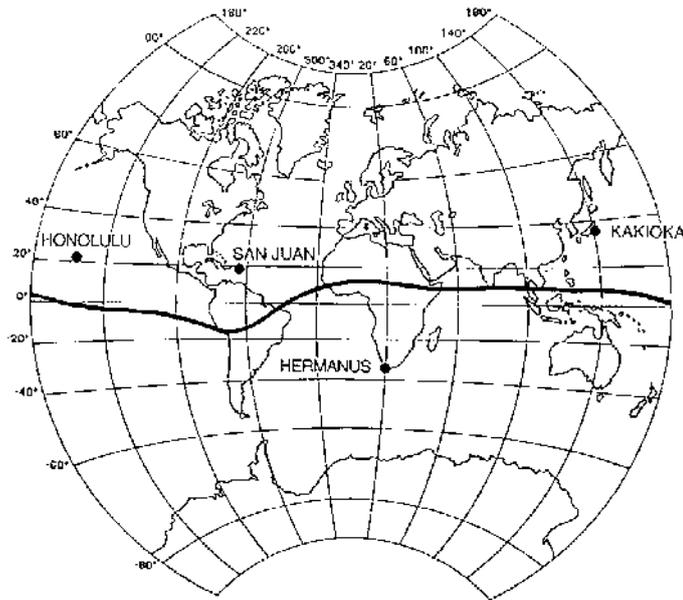


Figura 2.4. Estaciones utilizadas para el cálculo del índice *Dst*. Se muestra el ecuador geomagnético en línea sólida negra. Adaptado de <https://tinyurl.com/uorc42j>

En épocas de tormenta, las variaciones de H se caracterizan por una fuerte disminución en su intensidad, lo que indica un aumento en la intensidad de la corriente anillo. Este aumento se nota típicamente en escalas de horas por lo que el *Dst* es entregado a valores horarios. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Dst(T) = \frac{1}{4} \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta H_i}{\sum_{i=1}^4 \cos \theta_i}, \quad (2.2)$$

en donde ΔH_i son las variaciones de la componente horizontal, con las variaciones seculares y los campos Sq sustraídos y θ_i son las latitudes geomagnéticas de las estaciones.

En primer lugar, para remover la variación secular se realiza el siguiente procedimiento. Para el año en cuestión se calcula un valor promedio anual de la componente H , calculado con los valores medios diarios de los cinco días internacionalmente mas quietos de cada mes. Luego, este procedimiento se repite a los cuatro años anteriores y se ajusta un polinomio de segundo orden con los cinco puntos. La variación secular está representada con la parábola resultante, y se denomina línea de base H_0 .

Luego, se determina Sq con una serie de Fourier doble en tiempo local T y mes M de la forma:

$$Sq(T, M) = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 A_{mn} \cos(mT + \alpha_m) \cos(nM + \beta_n).$$

La serie contiene 48 coeficientes desconocidos A_{mn} , α_m y β_n . Estos coeficientes son obtenidos realizando un ajuste por mínimos cuadrados a curvas $Sq(T)$ promedio, determinadas con los cinco días mas quietos de cada mes. Previo al ajuste, las curvas $Sq(T)$ son corregidas restando

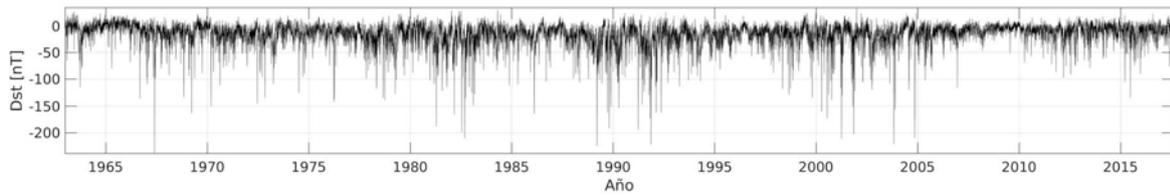


Figura 2.5. Secuencia completa de Dst (valores medios diarios).

la tendencia lineal que existe entre la medianoche local para un día y el siguiente.

El resultado es un valor de Sq para cada hora y mes del año. Se debe notar que esta es una manera estadística de determinar Sq y por lo tanto no reproduce de manera exacta el comportamiento de Sq para un día determinado. Sin embargo, el método estadístico es probablemente el más apropiado dado que los verdaderos valores de Sq no pueden ser identificados con suficiente precisión para cada día.

El campo perturbado $\Delta H(T)$ para un día en particular, utilizado para el cálculo de Dst mediante la Ecuación 2.2 es finalmente

$$\Delta H(T) = H(T) - H_0(T) - Sq(T, M).$$

En la Figura 2.5 se pueden observar los valores medios diarios de la serie de Dst desde sus comienzos en 1963 hasta la actualidad. Los picos en los valores más negativos corresponden a tormentas geomagnéticas extremas.

Tormentas

Las tormentas geomagnéticas son eventos dinámicos, que ocasionan perturbaciones en la magnetosfera que a su vez originan variaciones en todas las variables electromagnéticas medidas en la geosfera. Ocurren debido a un intercambio efectivo de energía del Viento Solar hacia la magnetosfera.

En latitudes medias, el índice Dst permite identificar cada una de las fases de una tormenta geomagnética. La primera es la Fase Inicial, caracterizada por un aumento repentino en el valor de Dst que da inicio a la tormenta. A este momento se lo denomina “Storm Sudden commencement” (SSC). El SSC se origina por un aumento en la presión del Viento Solar que impacta en la magnetopausa. Le sigue la Fase Principal, en donde los valores del índice decrecen y muestra sus máximas fluctuaciones. La magnitud de la disminución da cuenta de la intensidad de la tormenta. En la fase principal se produce el ingreso de energía a la magnetosfera causado típicamente por una componente negativa del Campo Magnético del Viento Solar sostenida en el tiempo. Por último, está la Fase de Recuperación que es la de mayor duración (varios días), durante la cual las condiciones vuelven a los niveles no perturbados. Llamaremos en lo que sigue a “tiempos de tormenta o perturbados” o “tiempos calmos” para referirnos a los momentos en los que se desarrolla una tormenta o no.

La Figura 2.6 muestra esquemáticamente los rasgos típicos de una tormenta geomagnética

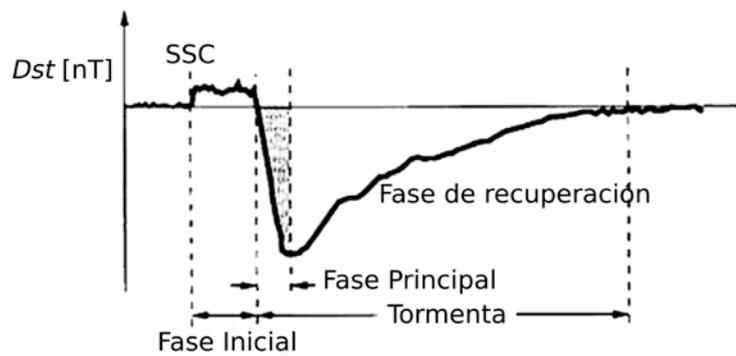


Figura 2.6. Gráfico esquemático del índice *Dst* identificando las distintas fases de una tormenta geomagnética. Adaptado de (Tsurutani et al., 2006).

en el índice *Dst*, con las fases enunciadas en el párrafo anterior.

2.2. El Viento Solar y medio Sol-Tierra

Las líneas del Campo Magnético Solar tienen polaridades distintas en ambos hemisferios y se distribuyen de manera radial cerca de los polos, pero cayendo hacia el Ecuador Solar a medida que se alejan del Sol, como muestra la Figura 2.7(a) (Pneuman & Kopp, 1971).

En el medio interplanetario, cerca del plano ecuatorial solar, el Campo Magnético del Sol llamado Campo Magnético Interplanetario (IMF) cambia abruptamente de signo en una lámina relativamente delgada. Esta lámina de densidad de corriente alta fluyendo en dirección perpendicular al IMF se denomina Lámina de Corriente Heliosférica (HCS por sus siglas en inglés). La rotación del Sol dobla las líneas del IMF y la geometría resultante toma la forma de una espiral de Arquímedes. En tres dimensiones la HCS no es plana y se asemeja a una “pollera de bailarina” como muestra esquemáticamente la Figura 2.8 (Parker, 1958). Esto garantiza que mas allá de una Unidad Astronómica, tomando una escala de tiempo suficientemente grande, la probabilidad de encontrar un IMF dirigido hacia el Sol o hacia afuera del Sol sea prácticamente la misma.

La Figura 2.7(b) muestra la distribución de las líneas de corriente en la HCS de acuerdo con el artículo de Riley (2002). Se muestran también las líneas del IMF vistas desde el Polo Norte Solar. En la órbita terrestre, las líneas de campo forman un ángulo de $\sim 45^\circ$ con los ejes $x^{\text{GSM}} \equiv x^{\text{GSE}}$ (ver Sección 2.8 para referencia de los ejes) ubicados en la dirección Tierra-Sol.

La polaridad del campo magnético en ambos hemisferios no es fija y se revierte cada 11 años aproximadamente. Este período de tiempo es conocido como Ciclo Solar de manchas o simplemente Ciclo Solar. Las Manchas Solares son regiones de la superficie solar (Fotósfera) con un campo magnético intenso y temperaturas mas bajas ($\sim 3700^\circ\text{K}$) que el resto de la Fotósfera (5700°K). Aparecen mas oscuras porque su campo magnético impide el ascenso

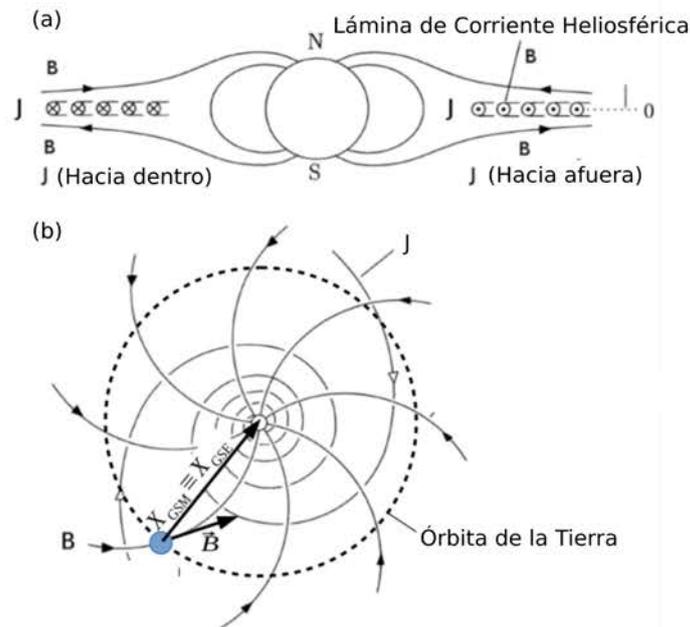


Figura 2.7. (a): Plano meridional que contiene el eje de rotación solar; a la izquierda la corriente generada en la HCS (J) entra a la página y viceversa en el lado derecho. Las líneas sólidas representan las líneas de campo magnético, que entran en el Hemisferio Norte Solar y salen en el Hemisferio Sur. (b) Vista del plano ecuatorial solar mostrando las líneas del IMF (B) que son perpendiculares a las líneas de J . La Tierra orbita en la línea punteada. Figura adaptada de (Rosales et al., 2018)



Figura 2.8. Figura de John Wilcox (investigador) y Werner Heil (artista) mostrando la HCS inferida por modelos basados en el Vientos Solar y el campo de la Corona. Imagen adaptada de (Rosales et al., 2018).

de calor desde el interior solar. Las manchas subsisten por días o semanas y su número varía con el tiempo, siendo máximas en actividad solar alta y mínimas en actividad solar baja. El conteo de manchas es muy utilizado para distinguir fases del Ciclo Solar. En el sitio <https://tinyurl.com/yc3ds5r3> se muestra el conteo de manchas y otros proxies que sirven para el monitoreo del Ciclo Solar como el índice F10.7.

2.2.1. Interacción Sol-Tierra

El Viento Solar es un plasma que emerge del Sol formado por protones, electrones e iones que se trasladan congelados al IMF a través del medio interplanetario.

Las partículas del Viento Solar pueden trasladarse en diferentes formas. Una de ellas es a través de las eyecciones de masa coronal (CME), que son grandes masas de plasma solar y campo magnético que causan las perturbaciones más importantes en el medio interplanetario. Estas se originan en la Corona Solar (ver Figura 2.9) (Owens & Forsyth, 2013). Otra fuente importante de perturbaciones son las nubes magnéticas, que son similares a las CME, pero con un campo magnético intrínseco más intenso.

Otra forma que tienen las partículas del Viento Solar de trasladarse es a través de las regiones de co-rotación (CIRs), que son regiones formadas por la interacción entre dos regímenes de Viento Solar: Viento Solar Lento ($\sim 300\text{km/s}$) y Viento Solar Rápido ($\sim 600\text{km/s}$). El Viento Solar Rápido se origina frecuentemente en los “Agujeros Coronales”, que son regiones de la Corona Solar con baja densidad de partículas y líneas de campo magnético abiertas hacia el espacio interplanetario. En épocas de actividad solar baja, los agujeros coronales se encuentran en las regiones polares del Sol. Pero típicamente en la fase descendente del Ciclo Solar, pueden existir en cualquier latitud heliográfica y persistir por varias rotaciones solares antes de evolucionar a una configuración magnética diferente.

Debido a la rotación solar, el plasma de Viento Solar rápido intercepta regiones con estructuras de la Corona que poseen Viento Solar lento (típicamente estructuras cerradas de campo magnético) y se produce una compresión del campo magnético de un lado y una rarefacción del otro, como muestra la Figura 2.9. Si el campo magnético posee una componente B_z^{GSM} negativa, esta puede verse amplificada por la compresión del campo y dar lugar a perturbaciones importantes en su interacción con la magnetosfera terrestre. La interacción se da por el proceso físico conocido como reconexión magnética (Petschek, 1964).

El período de rotación del Sol visto desde un sistema de referencia fijo es de 25 días, y se conoce como período de rotación siderea. Pero como la Tierra se traslada en la misma dirección en la que rota Sol, el período de rotación medido desde la Tierra es mayor. El período sinódico de rotación definido por Richard C. Carrington es de 27.2 días, y está dado por el tiempo promedio que le toma a un punto fijo del Sol en rotar y volver a la misma posición aparente vista desde la Tierra (Beck, 2000). Esta periodicidad hace que estructuras periódicas en el Viento Solar como los CIRs, causen efectos también periódicos en muchas variables medidas en el medio Sol-Tierra (Poblet & Azpilicueta, 2018).

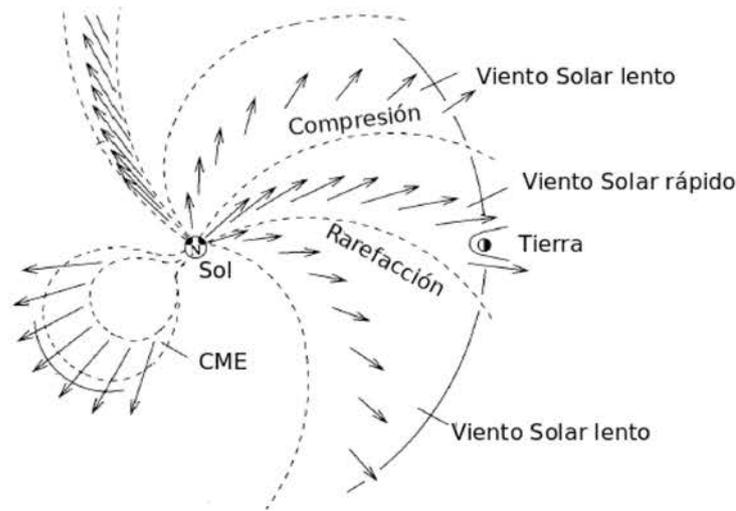


Figura 2.9. Estructuras del Viento Solar en la Eclíptica vistas desde el Hemisferio Norte Solar. Figura adaptada de (Prölss, 2004).

2.3. Flujo de Partículas, detectores y sistemas de coordenadas

Supóngase un detector de partículas ideal con un área de apertura δA_{\perp} que registra la incidencia de una cierta clase de partículas que viajan en la dirección \mathbf{u} , perpendicular al área, como muestra la Figura 2.10. Estas partículas caen dentro de un cono que subtende un pequeño ángulo sólido de $\delta\Omega$. Supóngase además que las partículas tienen energías cinéticas en el intervalo dado por E y $E + \delta E$ (no relativistas). Si δN es el número de partículas que atraviesan el detector en el tiempo δt , se puede escribir

$$\delta N = j \delta A_{\perp} \delta\Omega \delta E \delta t, \quad (2.3)$$

donde la constante de proporcionalidad j se denomina “flujo diferencial direccional” de las partículas y es función de la posición, el tiempo, la energía y la dirección. j representa el número promedio de partículas por unidad de tiempo, ángulo sólido y área perpendicular a la dirección de movimiento. Para estudios magnetosféricos, una unidad típica de j es $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{keV}^{-1}\text{ster}^{-1}$. Se le puede asignar un carácter vectorial a j escribiendo $\mathbf{j} = j\mathbf{u}$, de mo-

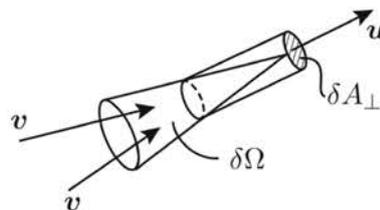


Figura 2.10. Elementos de un detector de partículas ideal. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).

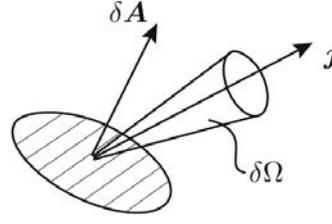


Figura 2.11. Vectores involucrados en un detector de partículas ideal. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).

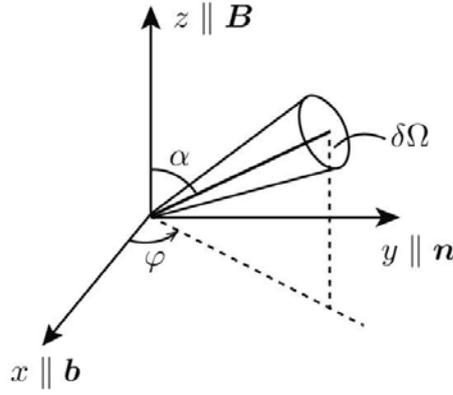


Figura 2.12. Parámetros de las mediciones de flujo en el sistema de coordenadas naturales definido en (Roederer & Zhang, 2014). Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).

do que el número de partículas que atraviesan el elemento de área $\delta\mathbf{A}$ orientado en cualquier dirección será (ver Figura 2.11):

$$\delta N_A = j\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}\delta A\delta\Omega\delta E\delta t = \mathbf{j}(\mathbf{r}, t, E, \mathbf{u}) \cdot \delta\mathbf{A}\delta\Omega\delta E\delta t.$$

En estas expresiones se ha asumido que δA es mucho menor al radio de giro de las partículas alrededor del campo magnético local (ver Sección 2.7.1), que se cumple en la mayoría de los detectores diseñados para estudios de los Cinturones de Radiación.

En un detector ideal la salida sería la tasa de conteo de partículas ($\delta N/\delta t$) que es proporcional al flujo local $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t, E, \mathbf{u})$ en la dirección \mathbf{u} . Los detectores reales en cambio, tienen funciones de transmisión, que deben ser determinadas cuidadosamente con mediciones de calibración. La conversión de cuentas a flujos direccionales es por lo general una tarea de gran dificultad.

Un sistema de coordenadas utilizado frecuentemente para el flujo en estudios de cinturones de radiación o estudios magnetosféricos es el denominado “sistema de coordenadas naturales” que está formado por coordenadas polares referidas al campo magnético local (Roederer & Zhang, 2014).

La Figura 2.12 muestra distintos parámetros geométricos referidos a este sistema. Si $\mu =$

$\cos\alpha$, dónde α es el ángulo de inclinación con respecto al campo magnético local de la partícula, será $\delta\Omega = \delta\mu \delta\varphi$ y se puede escribir $j = j(E, \mu, \varphi)$ en un determinado punto del espacio y tiempo. Si $\partial j/\partial\varphi = 0$, el flujo se denomina “flujo girotrópico”. En la práctica, las poblaciones de partículas atrapadas son por lo general girotrópicas. Si adicionalmente el flujo es independiente de μ , $\partial j/\partial\mu = 0$, se lo denomina “flujo isotrópico”. Por último, al valor integrado de j sobre el ángulo sólido Ω se lo denomina “flujo diferencial omnidireccional” ($\int_{\Omega} j(\mathbf{r}, t, E, \mathbf{u}) d\Omega$).

2.4. Funciones de Distribución y sus transformaciones

Las sensores proveen mediciones de j . Sin embargo, en la teoría se trabaja con funciones de distribución, que sirven de puente cuantitativo para vincular el estado instantáneo microscópico del conjunto de partículas con las variables macroscópicas que son mas fáciles de interpretar y medir.

Considérese al número de partículas δn que caen dentro de un pequeño volumen δr^3 con momentos y velocidades dentro de ciertos rangos al tiempo t . En coordenadas cartesianas δn será proporcional a δr^3 y al rango de momentos δp^3 (o velocidades δv^3) que posean:

$$\delta n = f_p(\mathbf{r}, t, \mathbf{p}) \delta r^3 \delta p_1 \delta p_2 \delta p_3 = f_v(\mathbf{r}, t, \mathbf{v}) \delta r^3 \delta v_1 \delta v_2 \delta v_3. \quad (2.4)$$

f_v y f_p son las “funciones de distribución”.

Habitualmente es conveniente trabajar con estas funciones en otras coordenadas por lo que es importante recordar las reglas de transformación entre sistemas. Supóngase que se desea transformar f de (x_1, x_2, x_3) a (y_1, y_2, y_3) ($f_x \rightarrow f_y$), donde $y_i = y_i(x_1, x_2, x_3)$. Se tiene:

$$\delta n/\delta r^3 = f_y(y_1, y_2, y_3) dy_1 dy_2 dy_3 = f_x(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3. \quad (2.5)$$

Las variaciones en los distintos sistemas de coordenadas en la Ecuación 2.5 se transforman según $dy_1 dy_2 dy_3 = J_{YX} dx_1 dx_2 dx_3$, dónde J_{YX} es el determinante de la matriz jacobiana de la transformación:

$$J_{YX} = \begin{vmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \frac{\partial y_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial y_3}{\partial x_1} & \frac{\partial y_3}{\partial x_2} & \frac{\partial y_3}{\partial x_3} \end{vmatrix}$$

la transformación inversa $f_y \rightarrow f_x$ está dada por $dx_1 dx_2 dx_3 = J_{XY} dy_1 dy_2 dy_3$, donde $J_{XY} = 1/J_{YX}$. En resumen, $f_{\text{nuevo}} = f_{\text{viejo}} J_{\text{viejo/nuevo}}$, dónde las funciones del lado derecho de la igualdad deben expresarse explícitamente en función de las nuevas variables. Esto es $f_{\text{viejo}} = f_{\text{viejo}}(x_1(y_1, y_2, y_3), x_2(y_1, y_2, y_3), x_3(y_1, y_2, y_3))$

Un ejemplo importante es la transformación del espacio de velocidades (v_1, v_2, v_3) al es-

2. Marco teórico

pacio de las variables (E, μ, φ) en el sistema de referencia natural. Si tiene:

$$\begin{aligned}v_1 &= v\sqrt{1 - \mu^2} \cos \varphi \\v_2 &= v\sqrt{1 - \mu^2} \sin \varphi \\v_3 &= v\mu,\end{aligned}$$

dónde $v = \sqrt{2E/m}$. El determinante de la matriz jacobiana de la transformación resulta $J_{\text{viejo/nuevo}} = v/m = (\sqrt{2E/m})/m$, entonces

$$\begin{aligned}f_{\text{nuevo}}(E, \mu, \varphi) &= \frac{1}{m} \sqrt{\frac{2E}{m}} f_{\text{viejo}}(v_1, v_2, v_3) = \\&= \frac{1}{m} \sqrt{\frac{2E}{m}} f_{\text{viejo}} \left(\sqrt{\frac{2E}{m}} \sqrt{1 - \mu^2} \cos \varphi, \sqrt{\frac{2E}{m}} \sqrt{1 - \mu^2} \sin \varphi, \sqrt{\frac{2E}{m}} \mu \right) \quad (2.6)\end{aligned}$$

Con la discusión previa, se puede vincular el flujo de partículas $j(E, \mu, \varphi)$ con las funciones de distribución. Considérese el elemento de superficie δA_{\perp} por el que cruzan perpendicularmente δN partículas con velocidad $\mathbf{v} = v\mathbf{u}$ durante el intervalo de tiempo δt dentro del ángulo sólido $\delta\Omega$. δN estará dado por la Ecuación 2.3. Antes del cruce estarán todas contenidas en un cilindro perpendicular a δA_{\perp} de volumen $\delta V = v \delta t \delta A_{\perp}$. Teniendo en cuenta la definición de función de distribución (Ecuación 2.4), se puede escribir $\delta N = f(E, \mu, \varphi) v \delta t \delta A_{\perp} \delta E \delta\Omega$ y al comparar con la Ecuación 2.3:

$$j(E, \mu, \varphi) = v f(E, \mu, \varphi). \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 2.6 se puede escribir

$$j(E, \mu, \varphi) = \frac{v^2}{m} f_v(v_1, v_2, v_3) = p^2 f_p(p_1, p_2, p_3). \quad (2.8)$$

Las Ecuaciones 2.8 conectan las funciones de distribución (requeridas para estudios teóricos) con el flujo de partículas (utilizados para estudios experimentales).

2.5. Densidad de energía

La densidad de partículas δn , en un pequeño volumen de dimensiones δr^3 puede ser determinada por $\delta n/\delta r^3$. Si se hace uso de la Ecuación 2.4, se puede calcular la densidad de energía total para un conjunto de partículas de masa m con las siguientes expresiones:

$$\varepsilon = \iiint E f(v_1, v_2, v_3) dv_1 dv_2 dv_3 = \iiint E f(E, \mu, \varphi) dT d\mu d\varphi = \iiint \frac{E}{\sqrt{2E/m}} j(E, \mu, \varphi) dE d\mu d\varphi.$$

En la última igualdad se ha utilizado la Ecuación 2.7 para transformar funciones de distribución en flujos y también la relación $v = \sqrt{2E/m}$. La dependencia espacial y temporal están

implícitas en estas expresiones. Si se asume flujo girotrópico se puede integrar las dependencias angulares como:

$$\varepsilon = \int_0^\infty \sqrt{\frac{mE}{2}} j(E) dE \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{2\pi} d\varphi,$$

con lo que resulta una expresión compacta para calcular la densidad total de energía en función del flujo y energía cinética:

$$\varepsilon = 2\pi \int_0^\infty \sqrt{2mE} j(E) dE \quad (2.9)$$

La Ecuación 2.9 será directamente aplicada en los estudios del Capítulo 5.

2.6. Relación de Dessler-Parker-Sckopke

Dessler & Parker (1959) encontraron teóricamente que para un estado estacionario, la energía cinética total (Ec) contenida por un conjunto de partículas confinadas en el Campo Geomagnético está relacionada linealmente con las variaciones en el Campo Geomagnético en el centro de la Tierra (ΔB) de la forma:

$$\frac{\Delta B}{B^e} = -\frac{2 Ec}{3 U_d}, \quad (2.10)$$

donde ΔB es la componente dirigida en la dirección contraria al dipolo, B^e es el campo Geomagnético en el Ecuador y U_d es la energía potencial magnética del dipolo por encima de la Tierra. La Ecuación 2.10 se conoce como la relación de “Dessler-Parker-Sckopke” (DPS).

Para encontrar esta relación, Dessler & Parker (1959) consideraron las siguientes idealizaciones: simetría axial, efectos gravitacionales nulos, distorsiones del campo magnético de primer orden, efectos nulos de las corrientes en la magnetopausa y la magnetocola y distribuciones especiales de partículas, con ciertos ángulos de inclinación con respecto al campo magnético local. Unos años más tarde, Sckopke (1966) demostró que la expresión sigue siendo válida sin considerar esta última aproximación, extendiendo la igualdad para cualquier distribución de ángulos. Las idealizaciones restantes son realistas y aceptadas por la comunidad, lo que refleja la utilidad de la relación DPS para relacionar distribuciones de partículas magnetosféricas con variaciones magnéticas en superficie.

Olbert et al. (1968) demostró que la Ecuación 2.10 puede ser derivada de una forma más directa y con menos complicaciones y aproximaciones matemáticas que las utilizadas en el reporte original, utilizando el Teorema del Virial (Chandrasekhar, 1960). La expresión encontrada por Olbert et al. (1968) es:

$$\frac{\Delta B}{B^e} = -\left(\frac{2Ec + U_p + U_{Tp}^i}{3U_d} \right),$$

que es más general que la Ecuación 2.10 ya que contiene la energía magnética de las partículas (U_p) y la energía potencial gravitacional resultante de la interacción de las partículas con la

Tierra U_{Tp}^i . Sin embargo, en la práctica $U_p + U_{Tp}^i \ll Ec$ y la expresión original sigue valiendo.

2.7. Cinturones de Radiación

En la Sección 2.1.4 se describió a la Magnetosfera en función de las corrientes principales que contiene. Otro modo de describirla es en función de los sistemas de partículas que contiene. Uno de estos sistemas es el que abarcan los denominados Cinturones de Radiación o Cinturones de Van Allen que será desarrollado en esta sección.

Los Cinturones de Radiación contienen electrones y protones que se distribuyen en forma de toroide, rodeando a la Tierra y centrados en la región ecuatorial. El cinturón interior se extiende desde el tope de la atmósfera neutra hasta unos 10000 km sobre el Ecuador y está compuesto principalmente por protones con energías que varían entre unos pocos MeV hasta varios cientos de MeV. El cinturón exterior en cambio, varía mucho en su ubicación, desde $r \sim 3R_T$ hasta $r \gtrsim 6.5R_T$ y está compuesto principalmente por electrones con energías entre los pocos cientos de keV a los cientos de MeV. La región que separa ambos cinturones (denominada “slot” en inglés) se caracteriza por la ausencia de partículas en los niveles de energía de ambos cinturones, debido a que la interacción con ondas magnetosféricas en esta región hace que precipiten a la atmósfera neutra (Lyons et al., 1972). Sin embargo, esta región si contiene electrones en niveles de energía mas bajos.

Las partículas energéticas que se alojan en ambos cinturones representan un riesgo para los sistemas espaciales que operan en estas regiones. Los componentes electrónicos de estos sistemas pueden resultar severamente dañados en eventos de Clima Espacial en los que se modifica la energía de las partículas, su distribución y cantidad en los cinturones. En la Figura 2.13 se muestran esquemáticamente los cinturones de radiación enumerando las fuentes que pueden provocar daños en cada región.

En la década del 50' James Van Allen lideró un equipo que permitió establecer la existencia de radiación atrapada naturalmente por encima de la Tierra, utilizando contadores Geiger a bordo de la serie de cohetes Explorer (Van Allen, 1957). Como destaca Kanekal S.G. en (Khazanov, 2016) Capítulo 10, Van Allen en sus notas expresó:

“I further concluded that the causative particles were present in trapped orbits in the geomagnetic field, moving in spairal paths back and forth between the Northern and Southern Hemispheres and drifting slowly around the Earth. The intensity of such trapped particles would be diminished at low altitudes by the cumulative effect of atmospheric absorption and scattering.”

Los contadores Geiger a bordo de la nave saturaron dando una cuenta nula, que fue correctamente interpretada por Van Allen como la presencia de una gran cantidad de partículas atrapadas.

Desde su descubrimiento, el estudio de los Cinturones de Radiación ha evolucionado mucho. Esto se debe a la mejora en la calidad de las observaciones de los complejos procesos físicos que llevan a la formación y el decaimiento de los cinturones.

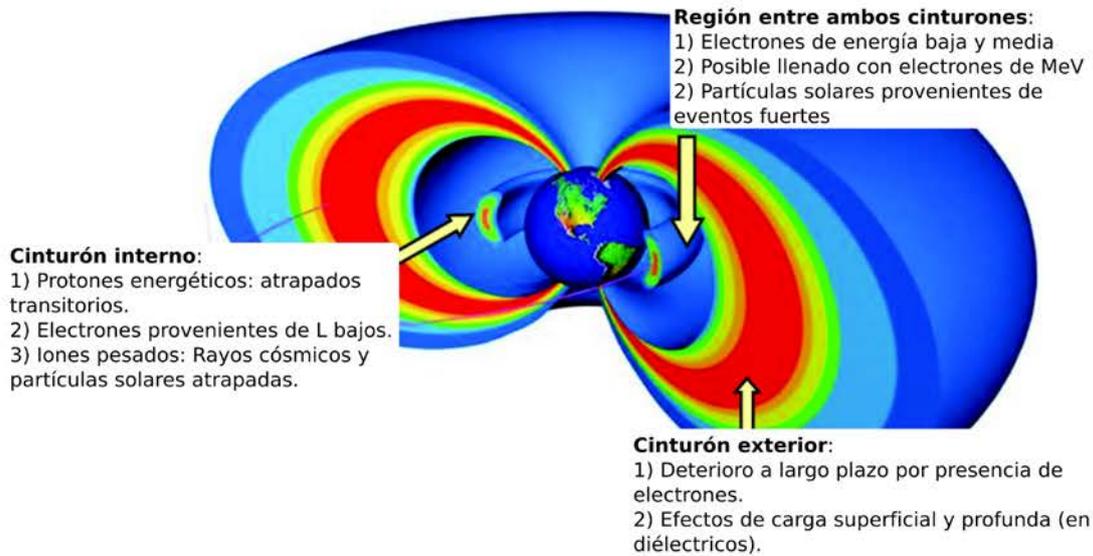


Figura 2.13. Diagrama esquemático de los Cinturones de Radiación con los principales riesgos en cada región. Adaptado de (Baker et al., 2017).

2.7.1. Movimiento de partículas cargadas atrapadas e invariantes adiabáticos

La representación del CMT como Campo Magnético Dipolar si bien no es la mas precisa, sirve para ilustrar y entender el movimiento de las partículas individuales en los Cinturones de Radiación. En esta aproximación, el movimiento es el resultado de la combinación de tres movimientos periódicos: el movimiento de la partícula alrededor de una línea de campo determinada, en la dirección paralela a la línea de campo y un drift alrededor de la Tierra en sentido meridional. Las escalas temporales asociadas a estos movimientos son de milisegundos, segundos y decenas de minutos respectivamente. Cada uno de los tres movimientos tiene asociado invariantes denominados “invariantes adiabáticos”. Estos se mantienen constantes siempre y cuando las variaciones en el campo magnético local sea en frecuencias similares a las de los tres movimientos (Schulz & Lanzerotti, 1974; Roederer & Zhang, 2014). Los invariantes adiabáticos son:

$$I_1 = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \quad (2.11)$$

$$I_2 = 2 \int mv_{\parallel} dl$$

$$I_3 = q\Phi. \quad (2.12)$$

m y q son la masa y carga de la partícula, B es la intensidad del campo magnético local, v_{\perp} y v_{\parallel} son las componentes de la velocidad de la partícula (no relativista) en dirección perpendicular y paralela a \mathbf{B} respectivamente. I_1 es llamado momento magnético porque es igual al momento magnético de una corriente generada por una partícula moviéndose

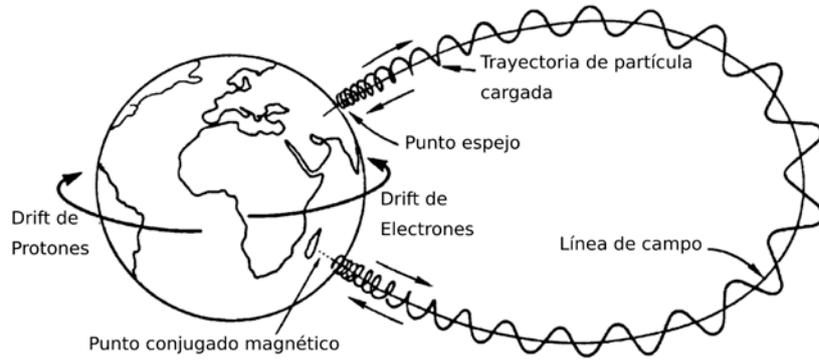


Figura 2.14. Gráfico esquemático mostrando los principales movimientos de las partículas cargadas atrapadas en las líneas del Campo Magnético Terrestre. Figura adaptada de (Prölss, 2004).

circularmente. I_2 representa la integral sobre la línea de B entre dos puntos “espejo”, que son los puntos donde v_{\parallel} cambia su dirección. I_3 es el flujo magnético a través de la superficie delimitada por el drift de una partícula alrededor de la Tierra (Φ) escalado por la carga. En la Figura 2.14 están ilustrados los tres movimientos típicos de una partícula atrapada en el CMT. El drift de los electrones es hacia el Este y el de las partículas cargadas positivamente hacia el Oeste.

2.7.2. Parámetro L

La expresión de I_1 en la Ecuación 2.11 indica que para que el invariante se conserve, las partículas con determinada masa y velocidad perpendicular quedarán atrapadas a un valor de B conveniente. Dado que el CMT es aproximadamente Dipolar, es decir que disminuye con la distancia al centro de la Tierra, los protones e iones se atrapan a distancias menores que los electrones por su mayor masa. Esto indica que si se encuentra una forma de describir líneas de campo, se puede tener información de la ubicación de las poblaciones de partículas. Un parámetro que es usado históricamente con este objetivo es L, definido en la aproximación dipolar como $L = r_e/R_T$, donde r_e es la distancia ecuatorial al centro de la Tierra.

El L dipolar fue muy utilizado en los primeros estudios de los Cinturones de Radiación, pero a medida que las mediciones se hacían más precisas, se hizo necesario determinar un L que tuviera en cuenta, por ejemplo, los multipolos geomagnéticos o la excentricidad del eje dipolar entre otras características. McIlwain (1961) encontró un L que tiene en cuenta aproximaciones más reales al CMT como por ejemplo las que resultan del IGRF, y que puede ser determinado con muy poco error de la forma $L = f(B, I_2)$, donde f es una función empírica determinada numéricamente. Este L es conocido como el “L de McIlwain”.

Una aproximación al L real aún mejor que el L de McIlwain es L^* , introducido por Roederer (1970) en sus estudios de la teoría adiabática del movimiento de partículas atrapadas en el CMT. L^* se calcula como $L^* = -2\pi k_0/\Phi R_T$, donde k_0 es el momento magnético dipolar y Φ es el flujo magnético del tercer invariante adiabático (Ecuación 2.12). El costo computacional en el cálculo de L^* es alto, ya que involucra la resolución de integrales en dos

dimensiones que se extienden globalmente (Konstantinidis & Sarris, 2015).

2.8. Sistemas de Coordenadas

En esta Sección se describen los Sistemas de Coordenadas utilizados para los análisis del presente trabajo. Se describe en primer lugar el Sistema de Coordenadas Geográfico que se utilizará para ubicar puntos en la superficie terrestre y luego los sistemas que permiten vincular la geometría del Viento Solar y su campo magnético arribando a la Tierra con el CMT. Todos los sistemas son geocéntricos.

Sistema de Coordenadas Geográfico (GEO)

El eje X positivo se ubica en el Ecuador terrestre y apunta desde el centro de la Tierra hasta el Meridiano de Greenwich (longitud 0°). El eje Z es paralelo al eje de rotación terrestre y su intersección con la superficie terrestre en el Hemisferio Norte forma el Polo Norte Geográfico. La Longitud Geográfica es el ángulo horizontal medido sobre el plano ecuatorial positivo hacia el Este desde el meridiano de Greenwich. La Latitud Geográfica es el ángulo vertical medido desde el plano ecuatorial en la superficie terrestre. Es positivo hacia el Norte.

Sistema Geocéntrico Solar Eclíptico (GSE)

El eje X apunta en la dirección Tierra-Sol. El eje Z está dirigido en la dirección perpendicular al plano de la eclíptica hacia el Hemisferio Norte. El eje Y completa la terna cartesiana.

Sistema Geocéntrico Solar Ecuatorial (GSEq)

En este sistema el eje X también está dirigido desde el centro de la Tierra hacia el centro del Sol, pero el eje Y no es paralelo al plano de la eclíptica sino al plano del Ecuador Solar, que está inclinado con respecto a la eclíptica unos 7.25° . El eje Z completa la terna siendo positivo hacia el Norte. El eje de rotación solar no será necesariamente paralelo eje Z pero sí caerá en el plano XZ de este sistema. La mitad del año la Tierra está al Norte del plano ecuatorial Solar y la otra mitad al Sur.

Sistema Geocéntrico Solar Magnetosférico (GSM)

Este es uno de los sistemas más utilizados para estudiar las interacciones Tierra-Sol. El eje X está en la dirección Tierra-Sol, con su origen en el centro terrestre, positivo hacia el Sol (al igual que GSE y GSEq). El eje Z positivo apunta hacia el Norte perpendicular a X y está siempre en el plano que contiene el eje dipolar y el eje X. El eje Y positivo apunta hacia el sector del atardecer.

2.9. Variación Semianual: Definiciones, antecedentes e hipótesis principales

La inclinación del eje de rotación terrestre con respecto al plano orbital genera las estaciones como rasgo más característico. Las estaciones se producen porque la exposición a la radiación solar es distinta en ambos hemisferios a lo largo del año provocando una variación estacional en parámetros meteorológicos como la temperatura en superficie o la presión. Como el eje dipolar geomagnético también está inclinado con respecto al plano orbital, existe asimismo una variación estacional (o semianual) en los parámetros que caracterizan a la meteorología espacial. Algunos de estos parámetros son: mediciones de la componente H del campo geomagnético (Azpilicueta & Brunini, 2012), la ubicación del foco de los campos Sq (Vichare et al., 2017), parámetros ionosféricos como $vTEC$ (Azpilicueta & Brunini, 2011) entre otros. La Variación Semianual en todos ellos se caracteriza por presentar niveles elevados de actividad cerca de los equinoccios con respecto a los niveles cercanos a los solsticios.

Dado que los registros de la actividad magnética por estaciones ubicadas en superficie se remontan mucho más atrás en el tiempo que los de cualquier otro parámetro que caracterice la actividad electromagnética en la geósfera, los primeros estudios de la Variación Semianual provienen de datos geomagnéticos. Uno de los primeros reportes fue publicado por Sabine (1852) hace más de 150 años. Sabine encontró que las tormentas geomagnéticas son más frecuentes y de mayor intensidad cerca de los equinoccios que cerca de los solsticios. Desde entonces, muchos trabajos se han publicado con relación al tema, en especial en la segunda parte del siglo pasado y en la década del 2000, tratando por un lado de caracterizar y por otro lado de establecer un mecanismo generador de esta variación (Russell & McPherron, 1973; Svalgaard, 1977; Crooker & Siscoe, 1986; Cliver et al., 2000, 2001, 2002).

En el panel izquierdo de la Figura 2.15 se puede observar la superposición de todos los años del índice Dst en un año patrón. Para un día del año (DOY) en particular se calculó el promedio con los valores medios diarios del índice para ese día de todos los años. El proceso es extendido para todos los DOY. La curva negra representa los valores promediados y la roja es una curva suavizada con una ventana móvil centrada de 30 días de longitud. Ambas curvas presentan un perfil típico de la Variación Semianual con máximos de actividad cerca de los equinoccios y mínimos cerca de los solsticios.

Una característica importante de esta variación es que no depende del nivel de actividad (calmo o de tormenta). Esto puede verificarse con las curvas del panel derecho en la Figura 2.15. Ambas fueron calculadas de la misma manera que las del panel izquierdo descritas anteriormente, pero seleccionando sólo los días en los que el promedio diario de Dst fue mayor a -100 nT, es decir, eliminando épocas de tormenta. El patrón semianual es evidente en este gráfico, con variaciones pico a pico similares a las de las variaciones resultantes de las superposiciones del Dst completo.

De la misma manera, puede demostrarse que así como la existencia de la Variación Semianual no depende del nivel de actividad magnética, tampoco depende del nivel de actividad solar (fase del Ciclo Solar) o de la polaridad de las líneas magnéticas del Sol con respecto a

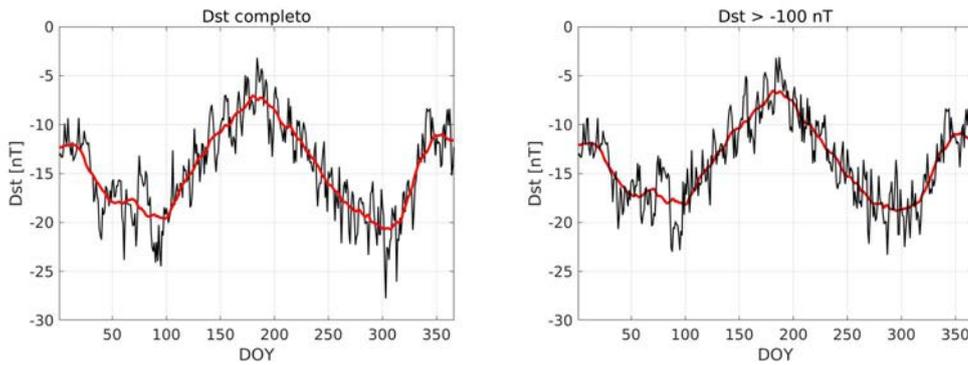


Figura 2.15. Panel izquierdo: Superposición del índice *Dst*. Panel derecho: Superposición del índice *Dst* pero considerando sólo los días con un valor medio diario del índice > -100 nT. La curva roja es la curva suavizada con un promedio móvil de 30 días de longitud en todos los casos.

las líneas del campo geomagnético (Ciclos Solares Magnéticos) (Cliver et al., 2001; Azpilicuenta & Brunini, 2012). Si bien, todos estos factores pueden alterar eventualmente el patrón semianual, esta variación está siempre presente y actúa como una modulación de fondo en la intensidad de la magnitud medida.

Sin embargo, para poder cuantificar esta variación como modulación en la amplitud en una variable determinada, un parámetro clave es la cantidad de datos con los que se cuenta. Este efecto se ilustra en la Figura 2.16: el panel (a) muestra los valores medios diarios del índice *Dst* para 1987. Los paneles (b), (c) y (d) muestran el resultado de superponer 6 años de valores medios diarios de *Dst* (de 1987 a 1992, aproximadamente medio ciclo solar), 10 años (el ciclo Solar 22 completo) y 20 años (ciclos solares 22 y 23 completos) de datos respectivamente. Las curvas rojas son las curvas suavizadas con una ventana móvil centrada de 30 días en todos los casos, al igual que para la Figura 2.15. Al tomar un sólo año, cualquier variación de largo período que module la intensidad del índice queda enmascarada por las variaciones o el ruido propio de ese año. En cambio, al aumentar la cantidad de años que se superponen ocurre lo contrario y la modulación de fondo comienza a hacerse evidente. De este modo, encontramos el patrón semianual mas claro en el panel (d) de la Figura 2.16, cuyas curvas se calculan con dos ciclos solares de observaciones. Aunque lo frecuente es encontrar la Variación Semianual enmascarada al observar un año en particular, existen años en los que esta variación se observa anormalmente nítida, como por ejemplo 1954 y 1996 (Cliver et al., 2004). De todos modos, el proceso de superposición permite tener una estimación real de su magnitud, variación pico a pico, locación de los máximos y mínimos, etc.

Como se ha utilizado aquí un índice de actividad magnética para ejemplificar la Variación Semianual en un parámetro determinado, se debe mencionar que el CMT posee también otras variaciones regulares de baja frecuencia proveniente de fuentes externas. Las mas destacadas son: la variación de ~ 11 de periodicidad causada por el Ciclo Solar, que se caracteriza por tener máximos de actividad en la fase descendente del Ciclo Solar y mínimos en la fase

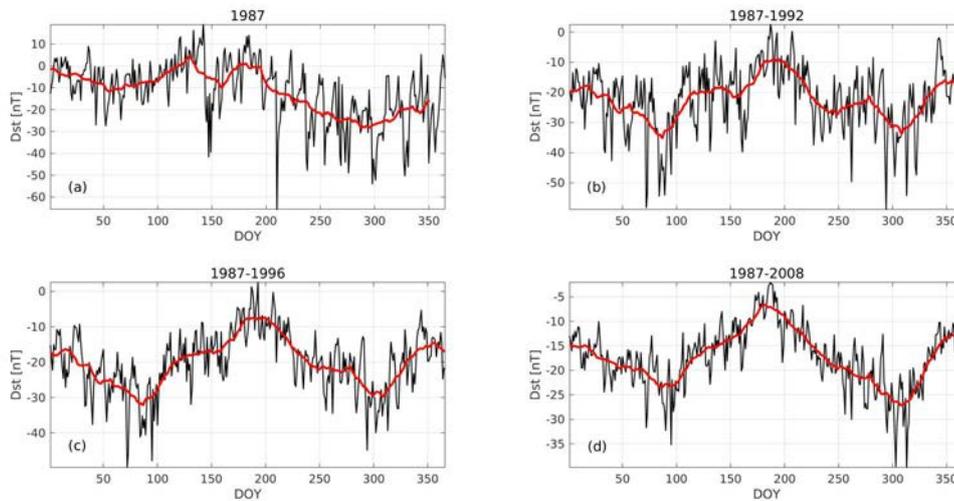


Figura 2.16. (a): Índice Dst para 1987. (b): Superposición de valores medios diarios de Dst en un año patrón. 6 años de datos fueron utilizados (1987-1992) (c): Misma referencia que para (b) pero con 10 años de datos (1987-1996). (d): Misma referencia que para (b) y (c) pero con 20 años de datos (1987-2008). Las curvas rojas representan en todos los casos un promedio móvil de la curva negra (curva superpuesta) con una ventana centrada de 30 días de longitud.

ascendente. La variación de ~ 27 días asociada a la rotación solar (Poblet & Azpilicueta, 2018) y la variación diurna mencionada en la Sección 2.1.3.

2.9.1. Teorías clásicas

En lo siguiente se describirán las tres teorías clásicas que se han elaborado para interpretar la Variación Semianual en la actividad magnética, y que pueden utilizarse para explicar esta variación en otros parámetros y/o mediciones. Estas son: Teoría Axial, Equinoccial y de Russell & McPherron. En las tres, los parámetros geométricos de la Tierra rotando y trasladándose alrededor del Sol juegan un papel central, por lo que en cada una de ellas puede identificarse un ángulo como controlador de esta variación. Los procesos físicos de las tres son variables e involucran reconexión magnética e inestabilidades entre plasmas entre otros.

Axial

La hipótesis Axial considera a la progresión de la latitud heliográfica de la Tierra en el año como el factor que controla la Variación Semianual. Cerca de los equinoccios, este ángulo es máximo/mínimo y la Tierra se encuentra mas expuesta a los agujeros coronales de latitudes heliográficas medias. Estos son fuente de Viento Solar rápido, que por medio de las estructuras que genera o bien por sí sólo sería mas geoefectivo que el Viento Solar lento.

Contrariamente, cerca de los solsticios, este ángulo es casi nulo, y la Tierra queda expuesta a regímenes de Viento Solar lento.

El primer reporte que relacionó la Variación Semianual en la actividad magnética con la latitud heliográfica fue desarrollado por Cortie (1912) quién en realidad propuso a las manchas solares como el posible candidato para producir la variación. La versión moderna, tomando los agujeros coronales surgió en las décadas posteriores (Bohlin, 1977). En la actualidad, esta teoría es la menos considerada para explicar la Variación Semianual.

Equinoccial

La Hipótesis Equinoccial funciona de manera distinta que la Axial y de Russell & McPherron (Sección siguiente) en el sentido de que lo que cambia a lo largo del año no son las condiciones (mas o menos favorables) del Viento Solar, sino la respuesta de la magnetosfera al Vientos Solar (Cliver et al., 2000). Durante los solsticios, la eficiencia en el acoplamiento entre ambos disminuye y la energía que ingresa a la magnetosfera se ve disminuida con respecto al resto del año.

Uno de los mecanismos físicos propuestos para explicar como varía este acoplamiento es la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz en los flancos de la magnetosfera (Boller & Stolov, 1970). Chandrasekhar (1962) estudió esta inestabilidad en el borde entre dos fluidos magnetohidrodinámicos incompresibles en movimiento relativo y encontró que, como primera aproximación, el criterio de inestabilidad:

$$u^2 > A \left(B_I^2 \cos^2 \gamma_I + B_m^2 \cos^2 \gamma_m \right) \quad (2.13)$$

puede aplicarse a la magnetopausa terrestre. En esta expresión, los subíndices I y m corresponden a los valores interplanetarios (en realidad a valores en la magnetovaina justo por afuera de la magnetopausa) y magnetosféricos respectivamente, u es el módulo de la velocidad del Viento Solar (\mathbf{u}), B es el campo magnético y γ es el ángulo entre \mathbf{u} y el campo magnético local. A es un factor que depende de las densidades del Viento Solar y plasma magnetosférico que puede considerarse constante.

Cuando el término del lado derecho de la desigualdad es mas pequeño las condiciones para la inestabilidad serán mayores y viceversa. Cómo los parámetros del Viento Solar suelen ser bastante variables, la Variación Semianual predicha por la Ecuación 2.13 está controlada por el término magnetosférico, en particular por el ángulo γ_m .

La Figura 2.17 muestra una sección de la magnetosfera en el plano XY del sistema de coordenadas GSM visto desde el eje Z positivo que coincide con la orientación del dipolo. El Viento Solar proviene de la dirección X y es perpendicular a la dirección del dipolo. Esta orientación en particular ocurre en los días de los equinoccios, dos veces por día. Dentro de la magnetopausa, en los flancos de la magnetosfera ubicados en los sectores del amanecer y atardecer, las líneas de campo están en el eje Z positivo (salientes en la Figura), por lo que el sistema local X' , Y' , Z' (X' en la dirección del viento, Y' perpendicular a la magnetopausa y $Z' = Z$) puede ser posicionado en cualquier lugar del flanco, cómo muestra la Figura.

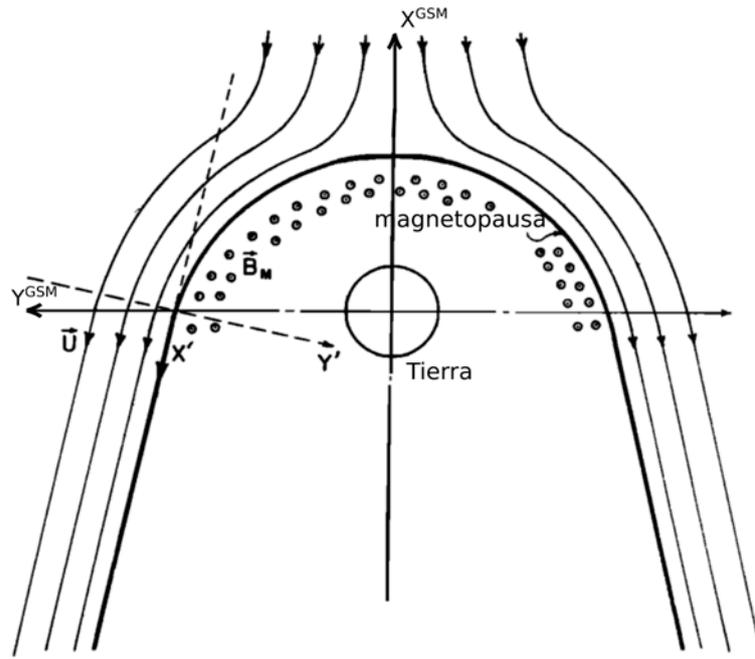


Figura 2.17. Plano XY de la magnetosfera en el sistema GSM visto desde Z positivo. Extraído y adaptado de (Boller & Stolov, 1970).

En este momento, $\gamma_m = 90^\circ$ y el término magnetosférico del lado derecho de la desigualdad en la Ecuación 2.9.1 es nulo y la inestabilidad es máxima. Esto implica que la transferencia de energía del Viento Solar también lo es. En los solsticios ocurre lo contrario, esto es, el término magnetosférico es máximo y la inestabilidad mínima, teniendo mínima eficiencia de acoplamiento.

Si bien la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz predice una Variación Semianual teniendo en cuenta el parámetro clave de la hipótesis equinoccial que es la colatitud magnética (γ_m), no está claro que este sea el proceso físico de fondo en esta hipótesis. Russell & McPherron (1973) menciona:

“This model (Boller-Stolov) is not quantitative, since the relationship between the growth rate of the instability and the expected magnitude of the associated geomagnetic activity is not given by the model. However, the model does predict definite diurnal and annual variations”

sugiriendo que es necesario una estimación cuantitativa de esta hipótesis, que explique las variaciones semianuales observadas.

Russell y McPherron

En la década del 60', los trabajos pioneros de Petschek (1964) y sobretodo de J. W. Dungey (Dungey, 1961, 1963, 1965) sobre reconexión magnética revelaron la importancia de la componente sur del IMF para producir actividad magnética. La hipótesis/efecto de Russell y McPherron (RM) (Russell & McPherron, 1973) surgió en la década posterior con el

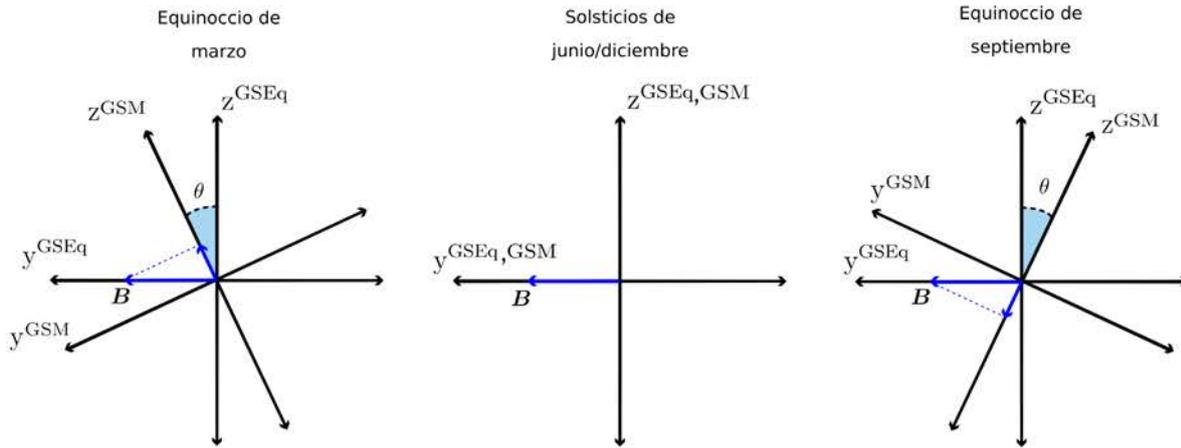


Figura 2.18. Representación esquemática en el plano YZ de los sistemas GSEq y GSM durante los dos equinoccios (paneles (a) y (c)) y durante los dos solsticios (panel (b)). El vector azul corresponde a la proyección del IMF (considerado saliente del Sol) en ambos sistemas.

fin de explicar el problema de la Variación Semianual en el marco de la teoría de reconexión. Este efecto establece que hay una probabilidad variable a lo largo del año de encontrar una componente sur del IMF en el Sistema de coordenadas GSM. Esto implica una probabilidad diferente de reconexión magnética entre el IMF y el CMT en la nariz de la magnetopausa. Cerca de los equinoccios(solsticios) la probabilidad es máxima(mínima).

El efecto RM supone tres condiciones sobre el IMF: (i) Que cae sobre las espirales de Parker, (ii) que puede estar dirigido hacia o en dirección contraria al Sol con igual probabilidad, (iii) la componente norte no provoca ninguna interacción. Con estas suposiciones, la Figura 2.18 ayuda a ilustrar el efecto. Los tres paneles muestran esquemáticamente las orientaciones de los sistemas de coordenadas GSEq y GSM (ver Sección 2.8) en el plano YZ, para cuatro momentos del año: los dos equinoccios (panel izquierdo y derecho) y los dos solsticios (panel central). Considerando el IMF sobre el plano ecuatorial solar dirigido hacia afuera de Sol, su proyección sobre los dos sistemas está dada por los vectores azules en la Figura. El ángulo θ es el ángulo entre z^{GSEq} y z^{GSM} .

En el equinoccio de marzo, la proyección del IMF cae sobre el lado positivo de y^{GSEq} (B en la Figura) que se proyecta sobre z^{GSM} positivo. Según el supuesto (iii) esta componente no interactúa y por lo tanto no genera actividad. Algo similar ocurre en los solsticios donde no se produce interacción porque la proyección sobre el eje z^{GSM} es nula en este caso. Sin embargo, para el equinoccio de septiembre la proyección del IMF sobre z^{GSM} negativo es no nula y esta componente si interactúa produciendo actividad magnética.

Si suponemos que el IMF está dirigido hacia el Sol, la proyección cae en el lado negativo de y^{GSEq} en los tres paneles y si bien la situación de los solsticios se mantiene igual, la de ambos equinoccios se invierte: en el de marzo obtenemos una componente sobre z^{GSM} negativo y en el de septiembre una componente sobre z^{GSM} positivo. El supuesto (ii) garantiza la

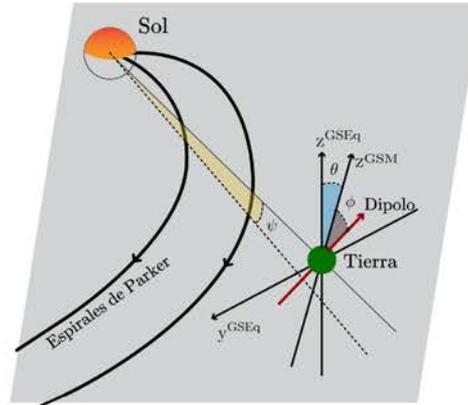


Figura 2.19. ϕ , θ y ψ en el medio Sol-Tierra (ver el texto para más detalle). Las espirales de Parker caen aproximadamente sobre el plano ecuatorial solar (plano en color gris).

aleatoriedad en la dirección del IMF durante todo el año de modo que en la práctica se encuentran componentes resultantes sobre z^{GSM} negativo durante todo el año. El ángulo θ es el que controla la amplitud de la proyección sobre z^{GSM} negativo y se utiliza para estimar características de la Variación Semianual predicha por esta hipótesis.

Patrones anuales de los ángulos

Teniendo en cuenta la variación anual del ángulo dominante en cada una de las tres teorías, se pueden construir curvas anuales, que muestran la Variación Semianual explícita y que sirven como referencia para comparar con la Variación Semianual detectada en algún parámetro en particular y determinar el efecto dominante. Para la hipótesis Axial se utilizará la latitud heliográfica de la Tierra (ψ). Para la Equinoccial se usará el ángulo delimitado por z^{GSM} y el eje dipolar terrestre denotado como ϕ , que es equivalente a la declinación solar magnética introducido como γ_m en la Sección 2.9.1 (posee la misma variación anual). Por último, para el efecto RM se toma el ángulo θ , delimitado por los ejes z^{GSM} y z^{GSEq} , ya mencionado en la Figura 2.18. Los rangos de variación de los valores diarios de los tres ángulos son: $[-7.2, 7.2]$, $[-23.2, 23.2]$ y $[-26.2, 25.8]$ para ψ , ϕ y θ respectivamente.

La Figura 2.19 muestra esquemáticamente los tres ángulos en el medio Sol-Tierra. El plano gris corresponde al plano ecuatorial solar en donde caen las espirales de Parker también mostradas en la figura.

Al graficar la evolución del valor absoluto de los tres ángulos a lo largo del año se obtienen las curvas de la Figura 2.20. Estas curvas representan valores medios diarios de los ángulos. Si se las grafica con una escala más precisa, por ejemplo a valores horarios se puede observar una oscilación de alta frecuencia en ϕ y θ que es debida a que estos ángulos consideran la posición del dipolo a lo largo del año, el cual está inclinado con respecto al eje de rotación terrestre (según se detalla en la Sección 2.1.2) y rota alrededor de este en un día. En valores medios diarios, esta oscilación desaparece. Se utiliza el valor absoluto porque el efecto de la

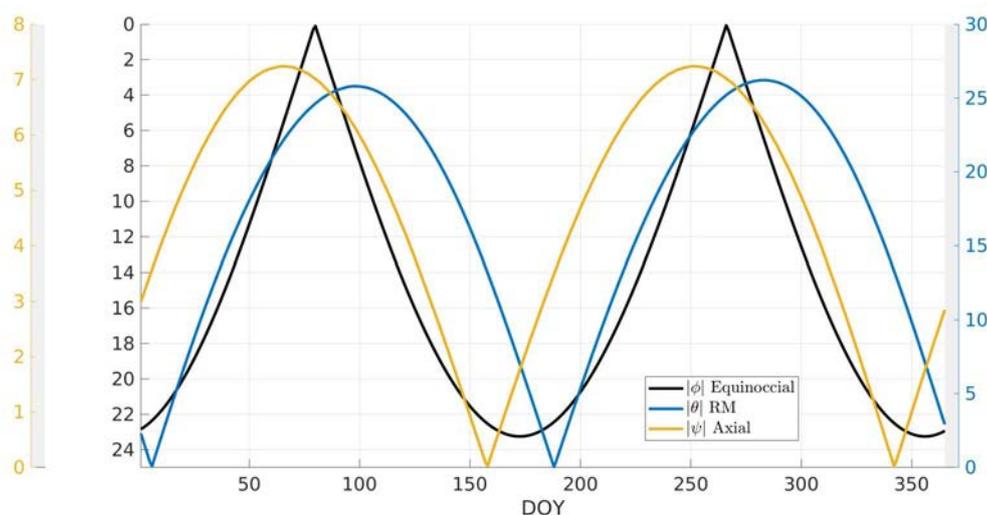


Figura 2.20. Valor absoluto de los ángulos asociados a la principales teorías de la Variación Semianual. ϕ , θ y ψ están asociados a la hipótesis equinoccial, RM y axial respectivamente.

	máx. marzo/abril	mín. junio/julio	máx. septiembre/octubre	mín. diciembre/enero
Equinoccial	21 marzo	22 junio	23 septiembre	22 diciembre
Russell & McPherron	7 abril	7 julio	11 octubre	6 enero
Axial	7 marzo	7 junio	9 septiembre	8 diciembre

Tabla 2.1. Fechas de máximos y mínimos para $|\phi|$, $|\theta|$ y $|\psi|$ suavizados. Notar que para ϕ los máximos en realidad son mínimos y viceversa. Sin embargo, la notación “máximo” y “mínimo” se refiere en este contexto a los máximos y mínimos en la actividad generada por la Variación Semianual, por eso se conserva la notación.

Variación Semianual es simétrico en ambos equinoccios(solsticios). Es decir, teóricamente en ambos equinoccios(solsticios) la actividad se ve aumentada(disminuida) de igual manera. Si se suavizan las tres curvas con un promedio móvil centrado, utilizando una ventana de 30 días de longitud (la razón de utilizar 30 días se verá en las próximas secciones) se obtienen las curvas de la Figura 2.21. Las tres curvas presentan rasgos distintos para la modulación semianual y se repiten año a año. Por ejemplo, el mecanismo equinoccial predice máximos mas agudos y mínimos mas amplios que la hipótesis axial y de RM. Los máximos y mínimos caen en distintas fechas indicadas explícitamente en la Tabla 2.1. Notar que en las Figuras 2.20 y 2.21 la escala de ϕ está invertida y por lo tanto los máximos en la Tabla son en realidad mínimos y viceversa. Sin embargo, la notación “máximo” y “mínimo” se refiere en este contexto a los máximos y mínimos en la actividad generada por la Variación Semianual, por eso se conserva la notación.

En la Figura 2.21 también se puede observar que $|\theta|$ suavizado alcanza valores ligeramente diferentes en ambos máximos. Esto se debe a que este ángulo está definido con el sistema

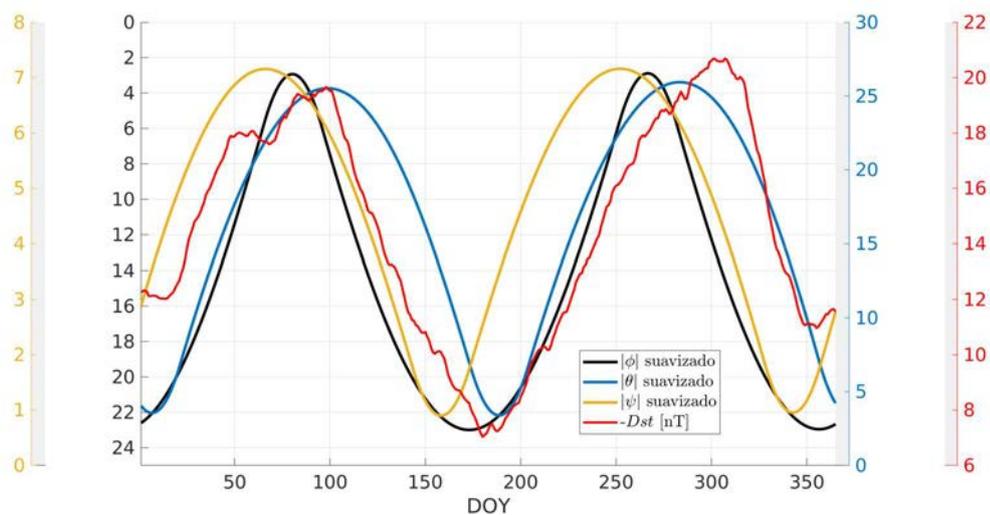


Figura 2.21. Valores absolutos suavizados de los ángulos ϕ , θ y ψ asociado con la teoría Equinoccial, RM y axial respectivamente. La curva roja representa el índice Dst superpuesto y suavizado como se indica en las Figuras 2.15 y 2.16.

de coordenadas GSEq y no el GSE como en algunos trabajos (Lockwood et al., 2016). Al considerar GSEq por sobre GSE también retrasa el tiempo de los máximos por algunos días, y es mas consistente con la definición original del efecto RM reportado en (Russell & McPherron, 1973) (ver por ejemplo la Figura 4 en dicho artículo).

Correlación de Dst con las hipótesis clásicas

En esta sección se describe la correlación del índice Dst superpuesto y suavizado, con los patrones semianuales predichos por los tres ángulos de las principales teorías.

La curva roja en la Figura 2.21 corresponde a la superposición y el consiguiente suavizado del índice Dst , tal y como fue introducido en la Figura 2.15 (panel izquierdo), sólo que en este caso está graficada con el signo cambiado para hacerla coincidir con las curvas de los ángulos. El coeficiente de correlación de la curva roja y las curvas de $|\psi|$, $|\phi|$ (invertido) y $|\theta|$ suavizadas da 0.56, -0.78 y 0.84 respectivamente, lo que demuestra un mejor acuerdo con la predicción de la hipótesis RM y un menor acuerdo con la predicción de la teoría Axial.

El índice Dst se ha utilizado aquí a modo de ejemplo ilustrativo para ver cómo se puede tener una idea del mecanismo dominante en la Variación Semianual de un determinado observable y es de utilidad puesto que esta metodología de correlación se aplicará en las secciones posteriores. Algunos autores han utilizado estos ángulos (o similares) para testear la hipótesis dominante en Variaciones Semianuales detectadas en otros índices geomagnéticos. Por ejemplo, Roosen (1966) utilizó el índice ap desde 1932 hasta 1966 y determinó que el patrón anual suavizado de este índice presenta una gran similitud con el ángulo que describe la Teoría Equinoccial. Por otro lado, Cliver et al. (2002) extendió la comparación de Roosen, pero utilizando el índice aa con 130 años de datos (1868 a 1998) y obtuvo valores altos de

2.9. Variación Semianual: Definiciones, antecedentes e hipótesis principales

correlación con $|\theta|$ pero especialmente con el ángulo $|\phi|$.

Capítulo 3

Datos y modelos

En este capítulo se describen en detalle los observables utilizados en este trabajo, que pueden ser agrupados en dos tipos. En primer lugar, se encuentran los datos geomagnéticos, que fueron utilizados para derivar oscilaciones de baja frecuencia en el CMT. En segundo lugar, se encuentran los datos satelitales, que corresponden a flujos de partículas y ondas magnetosféricas provenientes de tres misiones distintas. También, se describen también parámetros importantes utilizados en los capítulos siguientes como el parámetro L .

3.1. Datos geomagnéticos: Amplitudes de Pc5

Las oscilaciones del CMT en el rango de períodos Pc5 (100-600 s) son conocidas por tener la capacidad de acelerar electrones a energías relativistas por procesos de difusión radial, que rompen el tercer invariante adiabático de los electrones atrapados. Para derivar una estimación de estas oscilaciones (denominadas pulsaciones), se utilizaron observaciones geomagnéticas de la componente X (ver Sección 2.1.1), registradas cada 1 minuto por los observatorios de la red “Canadian Magnetic Observatory System” (CANMOS) (Lam, 2011). Los observatorios utilizados y su contribución a la serie de datos total están listados en la Tabla 3.1. Todos ellos están ubicados en la región auroral canadiense, dónde las líneas de campo geomagnético que salen de estas latitudes, llegan hasta distancias en el Ecuador donde orbitan los satélites GOES. El objetivo fue vincular mediciones de electrones relativistas en estas distancias radiales con variaciones magnéticas en superficie.

Como muestra la Tabla 3.1, los datos utilizados corresponden en su mayoría a la estación Fort Churchill (FCC) ubicada a una longitud de 94.1° W que está aproximadamente a medio camino de los GOES-East y GOES-West respectivamente (para referencias de GOES-East/West ver Sección 3.2.2). Los períodos con falta de datos o datos mal medidos en la secuencia de FCC fueron rellenos con mediciones de otros observatorios. Si se enumeran los observatorios utilizados para completar la secuencia de datos según la cantidad de datos aportada, se tiene primero a Yellowknife (YKC), le siguen Poste de-la-Baleine (PBQ) y Baker Lake (BLC) y por último Cambridge Bay (CBB). De la Tabla 3.1 se observa que los datos de FCC y YKC cubren en conjunto el $\sim 94\%$ del total de los días procesados.

3. Datos y modelos

Estación	Código	latitud Geográfica	longitud Geográfica	latitud Geomagnética	longitud Geomagnética	Porcentaje sobre el total de días medidos [%]
Fort Churchill	FCC	58.8°N	94.1°W	68.8°N	37.5°W	82.90
Yellowknife	YKC	62.5°N	114.5°W	69.1°N	67.3°W	10.73
Poste de-la-Baleine	PBQ	55.3°N	77.8°W	66.8°N	12.8°W	4.00
Baker Lake	BLC	64.3°N	96.0°W	72.7°N	35.5°W	2.01
Cambridge Bay	CBB	69.1°N	105.0°W	76.2°N	53.7°W	0.37

Tabla 3.1. Coordenadas de los observatorios de la red CANMOS utilizados para este estudio.

Para procesar los datos, primero se aplicó un filtro pasa banda a los valores al minuto de X para extraer las amplitudes en el rango de frecuencias de Pc5 (1.6-10 mHz). Luego, a los datos horarios de la componente X filtrada se le calculó una transformada de fourier, utilizando una ventana de Hanning y se obtuvo el espectro de potencia de la señal filtrada. Por último, se sumaron los valores horarios del espectro de potencia para obtener valores diarios. La serie resultante comprende dos ciclos solares de observaciones completas (Ciclo Solar 22 y 23).

3.2. Datos satelitales

3.2.1. Van Allen Probes (RBSP)

La misión “Van Allen Probes” (RBSP), inicialmente denominada “Radiation Belt Storm Probes”, está conformada por dos sondas idénticas que fueron lanzadas por NASA el 30/08/2012 y se mantuvieron operativas hasta el 18/10/2019 para la sonda RBSPa y hasta el 19/07/2019 para RBSPb, cuando se quedaron sin combustible. Estuvieron en operación durante siete años (mas de medio ciclo solar de datos correspondiente al Ciclo Solar 24). Las sondas aún se encuentran en órbita y midiendo y se espera que ingresen y se desintegren en la atmósfera cerca del 2030. Entre los varios objetivos de la misión, uno de los mas importantes fue el estudio de la variabilidad de los Cinturones de Radiación tanto espacial como temporalmente, y de cómo afectan a las operaciones satelitales.

Las órbitas de las sondas son elípticas, alcanzando unos 500 km de altura sobre la superficie en el perigeo y unos 30600 km en el apogeo con una inclinación que no supera los 18° del Ecuador. La elipticidad de la órbita permite barrer ambos Cinturones de Radiación, completando casi tres órbitas en un día. A modo de ejemplo, la Figura 3.1 presenta las trayectorias de las sondas RBSPa (puntos negros) y RBSPb (puntos rojos) para el día 27/01/2016 en el sistema GSE.

Cada sonda transporta una variedad de instrumentos que pueden agruparse en cinco experimentos principales que llevan a cabo los objetivos de la misión. Algunos de estos experimentos principales son utilizados en este trabajo y se describen en las secciones siguientes. La Figura 3.2 muestra un esquema de una de las sondas con los instrumentos que transporta.

El sitio denominado “RBSP Science Gateway” en <http://rbspgway.jhuapl.edu/> fue

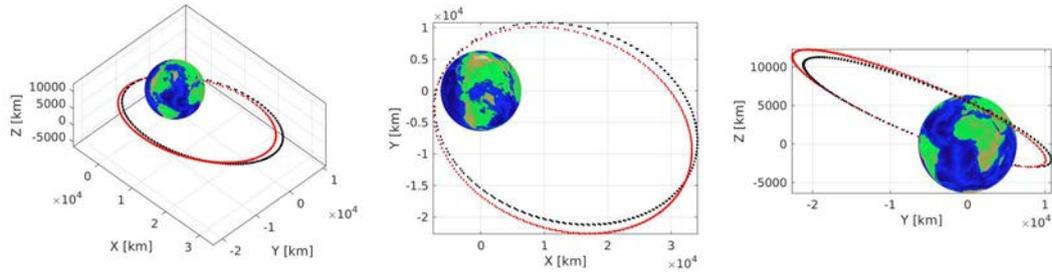


Figura 3.1. Trayectorias de las sondas RBSPa (puntos negros) y RBPSb (puntos rojos) para el día 27/01/2016 en el sistema GSE.

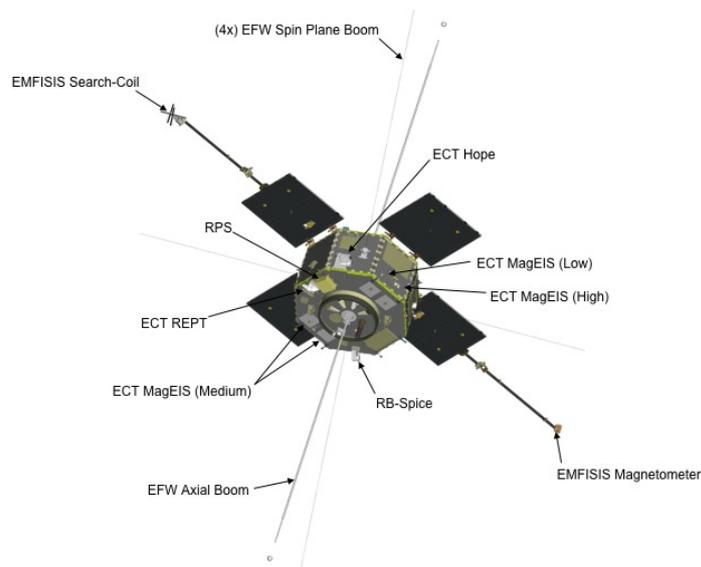


Figura 3.2. Sonda RBSP con los experimentos que contienen la variedad de instrumentos que realizan las mediciones. Figura tomada de <https://tinyurl.com/qlngcko>

3. Datos y modelos

```
{'Epoch'          } {'Default product time'          }
{'BuBu'           } {'Autocorrelation of the SeachCoil U axis' }
{'BvBv'           } {'Autocorrelation of the SeachCoil V axis' }
{'BwBw'           } {'Autocorrelation of the SeachCoil W axis' }
{'EuEu'           } {'Autocorrelation of the Electric Field U axis' }
{'EvEv'           } {'Autocorrelation of the Electric Field V axis' }
{'EwEw'           } {'Autocorrelation of the Electric Field W axis' }
{'WFR_bins'       } {'WFR # of bins summed'         }
{'WFR_bandwidth'  } {'WFR bin bandwidth'          }
{'WFR_frequencies'} {'WFR frequencies for the binned power spectra.' }
{'TotalPowerB'    } {'Sum of the autocorrelations of the search coil U, V and W axes.' }
{'TotalPowerE'    } {'Sum of the autocorrelations of the electric field U and V axes.' }
{'chorusQE'       } {'On board calculated Quality Factor.' }
{'JCBflagsFiveChanWNA' } {'5 Channel waveform is being used for onboard Wave Nomral Ananlysis.' }
{'JCBflagsUseCalibratedWFRData' } {'On board WNA is using calibrated WFR data.' }
{'JCBflagsUseDespinData' } {'On board WNA program is despining data.' }
{'LWEXzGainW'     } {'LWEXzGainW' }
{'LWEXyGainUV'    } {'LWEXyGainUV' }
{'SOMGain'        } {'Search coil in line attenuator flag' }
{'SPTT'           } {'Sun Pulse Time Tag' }
{'MET'            } {'MET' }
{'APID'           } {'ID of the data packet product' }
```

Figura 3.3. Productos disponibles en un archivo cdf de EMFISIS para un día en particular.

creado para hacer de interface central interactiva de todos los instrumentos de la misión, conteniendo bibliografía actualizada y acceso a los datos de las sondas y productos que de ellos se desprenden. Además de este sitio, los datos de RBSP pueden ser encontrados en los sitios especializados de cada instrumento, por ejemplo: <https://emfisis.physics.uiowa.edu/data/index> para EMFISIS o <https://www.lanl.gov/mission/index.php> para ECT entre otros. Por último, NASA también distribuye los datos en <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/rbsp/>, que fue el sitio utilizado en este trabajo para descargarlos.

Los datos vienen en formato cdf y desde el sitio <https://cdf.gsfc.nasa.gov/> NASA provee los paquetes necesarios para ser leídos desde MATLAB, Python y otros lenguajes de programación. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de los productos que vienen en un archivo cdf correspondiente a EMFISIS de RBSPb para un día en particular.

Los productos de los instrumentos se distribuyen en niveles, dónde a medida que aumenta el nivel, los productos son mas elaborados. En las secciones correspondientes a cada experimento se explicita qué nivel ha sido utilizado en cada caso. Para este trabajo se utilizaron los datos entre los años 2013 y 2018 inclusive. En el Capítulo 5 se procesan los datos de ambas sondas, RBSPa y RBSPb de manera combinada y en el Capítulo 5.1 el de ambas sondas pero de manera separada. De todos modos, los resultados utilizando datos de una sonda, pueden replicarse perfectamente con la otra. En la sección correspondiente se indicará la sonda es utilizada.

Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite (ECT)

“Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite” (ECT) comprende tres instrumentos: “Magnetic Electron Ion Spectrometer” (MagEIS) (Blake et al., 2013), “Helium Oxygen Proton Electron” (HOPE) (Funsten et al., 2013) y “Relativistic Electron Proton Telescope” (REPT) (Baker et al., 2012).

HOPE es un espectómetro de masas diseñado para medir flujo de iones y electrones en todas direcciones. Fue diseñado para cubrir el rango de energía entre 1 eV y 50 keV en 36 canales de energía espaciados logarítmicamente. MagEIS consta de cuatro espectómetros magnéticos en cada sonda, uno de baja energía, capaz de medir iones y electrones en 20-240

keV, dos de energía media que mide en 80-1200 keV y uno de alta energía 0.8-4.8 MeV. Por último, REPT está formado por una serie de detectores de estado sólido de silicio, dispuestos en forma de telescopio. Una carcasa gruesa rodea a los detectores para protegerlos de radiación penetrante y bremsstrahlung. Este instrumento está diseñado para medir principalmente electrones en el rango $\sim 1-20$ MeV.

Para el estudio de electrones desarrollado en el Capítulo 5.1 se utilizan datos del Nivel 3 de los tres instrumentos de ECT, aunque principalmente de MagEIS y REPT, que juntos tienen la capacidad de medir flujos de electrones desde ~ 20 keV hasta ~ 20 MeV. Los datos de electrones de MagEIS contienen contaminación de fondo en algunos períodos, causada principalmente por protones energéticos del cinturón interior de Van Allen (Claudepierre et al., 2015). Por lo tanto, se priorizó el procesamiento de flujos de electrones corregidos por sobre los medidos, siempre y cuando estuvieran disponibles en los archivos cdf del instrumento (los flujos corregidos se distribuyen con el nombre FEDU_CORR y los sin corregir con FEDU).

En el caso de los electrones energéticos de REPT, Claudepierre et al. (2015) demostró que la presencia de contaminación de fondo se vuelve importante para valores de L bajos y también para valores de L muy grandes cuando los valores de flujo medidos son menores a $10 \text{ cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$. Para evitar estos efectos se fijó un valor de corte mínimo en los datos de $20 \text{ cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$, por debajo del cual todos los valores de flujo fueron excluidos.

En la primera parte del Capítulo 5.1, desde la Sección 4.1.1 hasta la Sección 4.1.2 se utilizan datos de los sensores MagEIS y REPT de RBSPa para los años 2013-2018 completos. Los flujos de electrones utilizados son los que corresponden a los canales: 0.108, 0.235, 0.47, 0.597, 0.909, 1.8, 2.6, 3.4, 4.2, 5.2 and 6.3 MeV. En las Secciones 4.1.3 y 4.1.4 se incorporan los datos de la sonda RBSPb.

Los tres instrumentos de ECT entregan datos de flujo a intervalos regulares del ángulo de inclinación con respecto al campo magnético local. Para este estudio, se utilizan flujos diferenciales promediados para el rango de ángulos de inclinación con respecto al campo magnético local de $\sim 50 - 130^\circ$ en la mayoría de los casos. La excepción son los datos de RBSPb-REPT para el año 2018. Para este instrumento en este año se utilizan los flujos promediados en todos los ángulos (denominados FESA) porque son los únicos disponibles. Al realizar un análisis de las intensidades alcanzadas, se concluye que no hay diferencias apreciables con los otros tipos de flujo por lo que son utilizados para completar la serie.

Los valores de energía de HOPE son dinámicos, esto quiere decir que mide distintas energías según la época. Por lo tanto, para limitar los flujos a una energía determinada, se aplica un filtro tomando los datos en una ventana de 10 keV centrada en el valor central que corresponde al nivel de energía de interés.

Por último, se utilizan los valores de L de McIlwain alcanzados por ambas sondas (disponibles en los archivos) para todo el período de medición procesado. El modelo magnético utilizado para el cálculo de este L es el modelo de Olson & Pfitzer (OP77Q) (Olson, 1974). OP77Q es un modelo analítico del campo magnético terrestre válido desde la magnetopausa en el lado diurno, hasta aproximadamente la órbita lunar en el lado nocturno. Representa sólo la Magnetosfera calma y considera las contribuciones de la Magnetopausa, Magnetocola

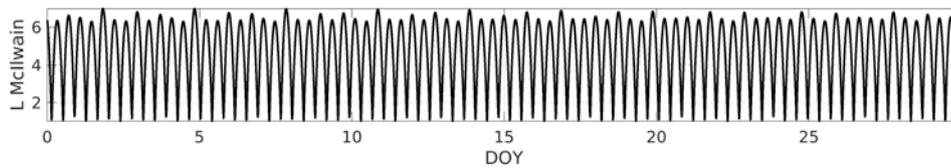


Figura 3.4. L de McIlwain calculado con OP77Q para los primeros días del año 2013. Los datos provienen de RBSPb-ECT.

y Corriente Anillo. El campo de origen interno es considerado dipolar.

La Figura 3.4 muestra en forma de ejemplo el L de McIlwain alcanzado por RBSPb para los primeros días del año 2013.

Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS)

“Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science” (EMFISIS) contiene sensores capaces de medir el campo magnético y eléctrico así como también el contenido de ondas magnéticas y eléctricas (Kletzing et al., 2013) en la magnetosfera. Los datos son entregados en dos resoluciones temporales. La primera corresponde a la resolución en tiempo que es de 64 valores por segundo (64 Hz) y es utilizada para los valores de campo eléctrico y magnético. La segunda, es la resolución en frecuencia que cubre el rango ~ 10 Hz - 400 kHz y es utilizada para resolver ondas magnetosféricas. EMFISIS contiene un magnetómetro del tipo “magnetic search coil” (MSC), un Fluxgate y los datos de campo eléctrico los toma del experimento EFW (Wygant et al., 2013). Los campos son medidos en sus tres componentes en un sistema de referencia rotante, solidario a las sondas, denominado *UVW*. Dos de los ejes (*U* y *V*) son paralelos al plano de rotación de las sondas y el tercero (*W*) perpendicular a este plano.

Los datos de ondas utilizados para este trabajo corresponden al Nivel 2, porque son los que se recomienda usar en el sitio ya que están debidamente calibrados (revisar <https://tinyurl.com/tq8x528>). Específicamente, se utiliza el producto “WFR Spectral Matrix” de la sonda RBSPb, que entrega el espectro de potencia de las autocorrelaciones del campo eléctrico y magnético entre sus tres componentes en el sistema sistema *UVW*, utilizando el rango de frecuencias 2 Hz y 12 kHz. Se utilizan sólo los espectrogramas de la componente *U* del campo eléctrico. Como resultado de la disposición de los sensores en las sondas, la componente *U* o *V* suelen captar con mayor precisión el contenido de ondas.

La Figura 3.5 muestra un espectrograma tomado de la misión “Combined Release and Radiation Effects Satellite” (CRRES) donde se puede observar la variedad de ondas magnetosféricas que pueden ser identificadas. En este trabajo, el foco está puesto solo en las “ondas coro” (chorus waves según su denominación en inglés). En el panel izquierdo de la Figura 4.8 se puede observar un espectrograma de EMFISIS para un día particular, medido por la sonda RBSPb.

Por último, también se procesan las mediciones de campo magnético, específicamente el

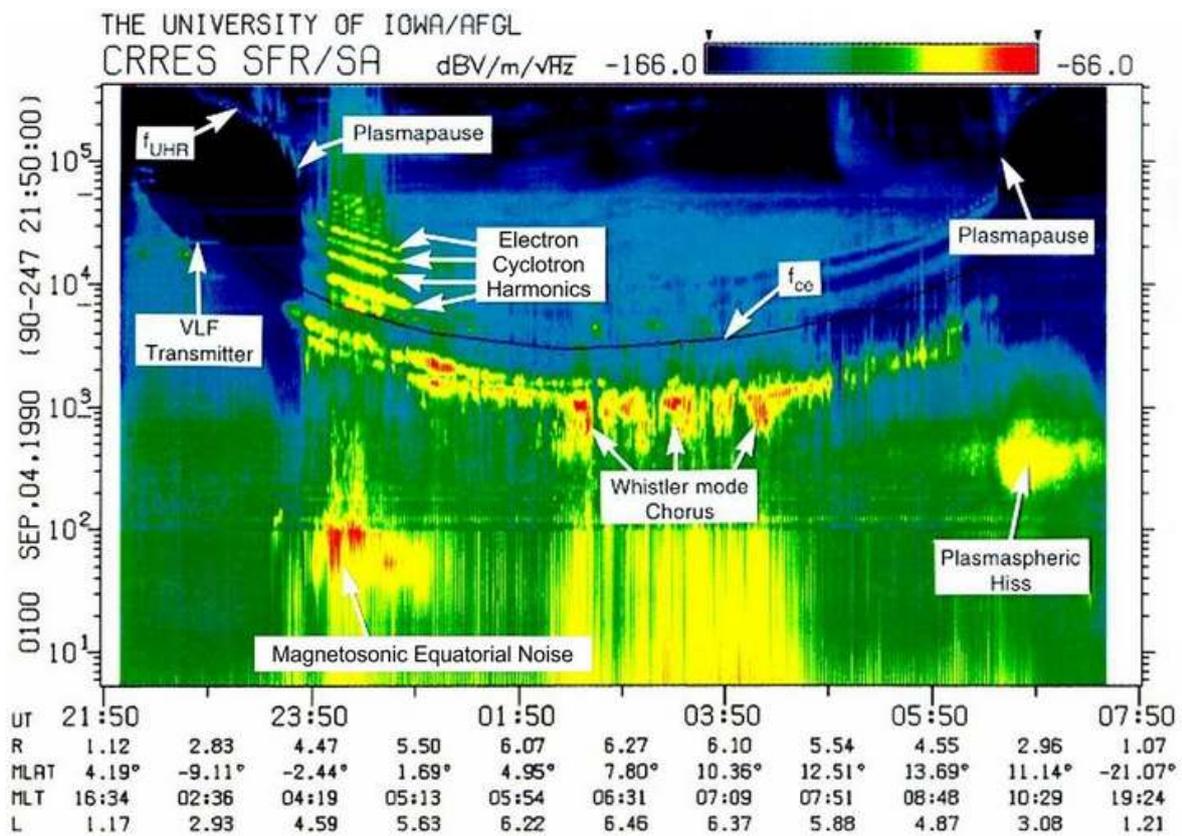


Figura 3.5. Espectrograma para el día 04/09/1990 tomado por la misión “Combined Release and Radiation Effects Satellite” (CRRES). Figura adaptada de (Wygant et al., 2013).

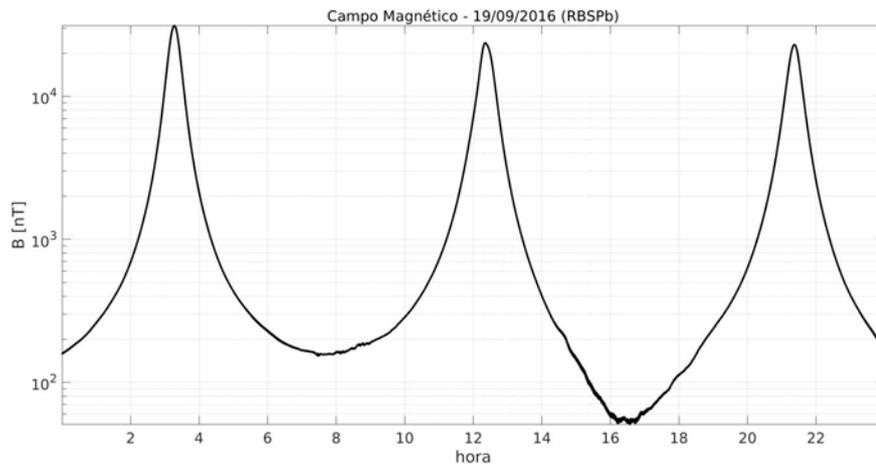


Figura 3.6. Módulo del campo magnético medido por EMFISIS en RBSPb para el día 19/09/2016.

módulo del vector B . En la Figura 3.6 se muestran los valores de B para un día en particular.

Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE)

“Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment” (RBSPICE) es el instrumento de RBSP diseñado para estudiar la Corriente Anillo terrestre. Fue diseñado específicamente con dos propósitos: estudiar la formación de la Corriente Anillo durante períodos de tormentas y estudiar cómo esta corriente influye en la formación y decaimiento de las partículas en los Cinturones de Radiación. Este instrumento es un espectómetro de masas diseñado para medir iones desde los ~ 20 keV hasta los ~ 1 MeV. Por otro lado, también se diseñó para tomar mediciones de electrones entre ~ 25 keV y ~ 1 MeV que sirvan para monitorear posibles daños en el instrumento como consecuencia de electrones energéticos.

Para este trabajo se utilizan los productos del Nivel 3, específicamente los archivos “Pitch Angle And Pressure” (PAP) que contienen, entre otros productos, presiones perpendiculares y paralelas al campo magnético, densidad de partículas para cada canal de energía, etc. (para una lista completa de los productos de este nivel, se puede revisar el handbook del instrumento en el sitio http://rbspice.ftecs.com/RBSPICE%20Data%20Handbook_Rev_d.htm). Se utilizan sólo los flujos omnidireccionales de H^+ , O^+ y He^+ de ambas sondas para el período 2013-2018.

La Figura 3.7 muestra valores diarios de los distintos canales de energía para las tres especies de ambas sondas. Se puede observar que hay intervalos temporales en los cuales los canales mas altos dejan de medir y entregan valores nulos. Además, en la primer parte del año 2013, O^+ no entregó valores en ningún canal de energía. Este problema se replica con las especies H^+ y He^+ de la sonda RBSPa.

Para procesar los datos se decidió tomar niveles de energía lo mas estables posibles en todo el período 2013-2018. Se procesaron entonces los flujos en los siguientes intervalos de

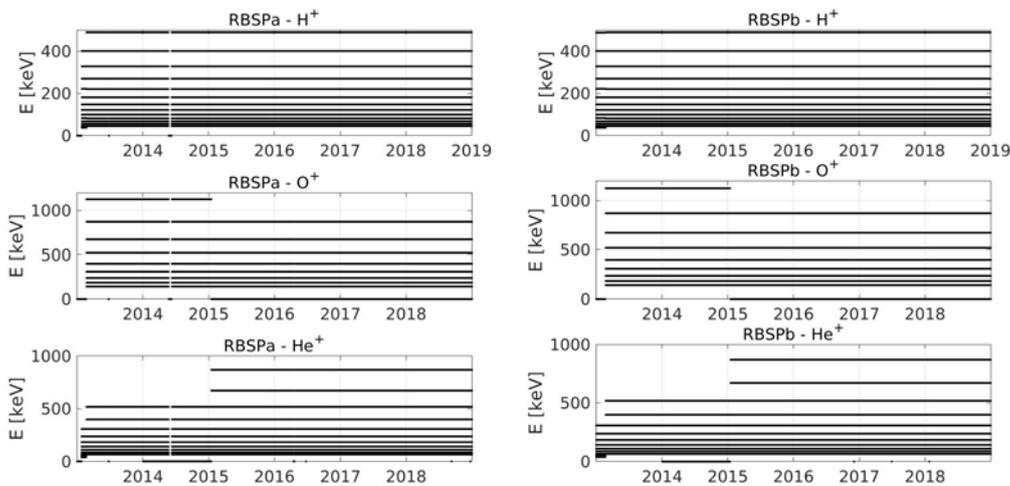


Figura 3.7. Estabilidad de los canales de energía para las tres especies (H^+ , O^+ y He^+) para ambas sondas durante todo el período de medición utilizado en este trabajo (2013-2018).

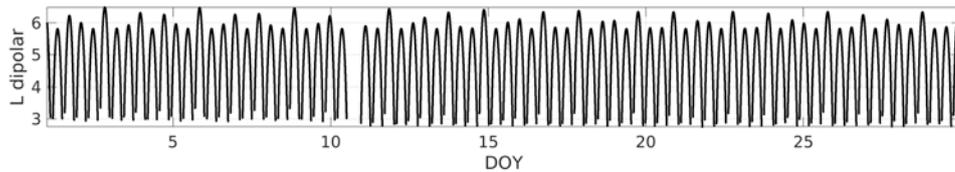


Figura 3.8. Valores de L dipolar entregados por RBSPb-RBSPICE para los primeros días del año 2013.

energía para ambas sondas: 44.7-488.9 keV para H^+ , 142-870 keV para O^+ y 65-518 keV para He^+ . La estabilidad de los canales de energía es crucial ya que parte del procedimiento del Capítulo 5 involucra la integración sobre los valores de la energía.

De los productos del Nivel 3 que entrega RBSPICE se tomaron también los valores de L dipolar para todo el intervalo temporal. Un ejemplo de dichos valores de la sonda RBSPb se encuentran en la Figura 3.8 para los primeros días del año 2013.

Consideraciones de la órbita de las sondas: precesión del apogeo

Si bien las ~ 3 órbitas de cada sonda RBSP en un día son muy parecidas, tienen una pequeña deriva en longitud que hace que la línea que une el apogeo con el perigeo de cada órbita rote con el tiempo completando una vuelta cada dos años aproximadamente. En la Figura 3.9 están representados, para cada día, el Tiempo Local Magnético (MLT) correspondiente al máximo valor de L de McIlwain alcanzado entre las dos sondas en ese día.

Si se observa el inicio del año 2015, el tiempo para el que L se hace máximo (coincidente aproximadamente con el apogeo) está en ~ 00 hs MLT. Luego de casi dos años de precesionar, al comienzo del año 2017 el apogeo vuelve a alcanzar los mismos valores de MLT.

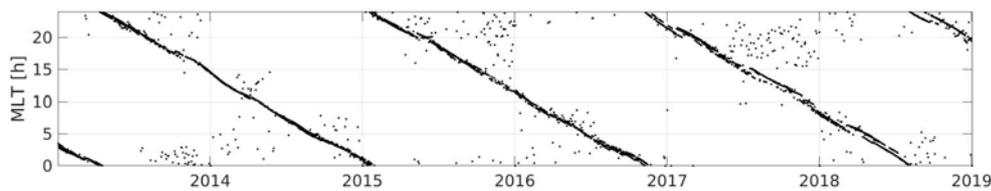


Figura 3.9. Tiempos Locales Magnéticos del valor máximo de L de McIlwain alcanzado entre las dos sondas en cada día.

Esta periodicidad puede aparecer en los análisis dependiendo de qué variable se analice y cómo. En este trabajo, se utilizan básicamente flujos de partículas que no reflejan una periodicidad evidente de ~ 2 años. Por el contrario, si apareció cuando al estudiar ondas coro en la Sección 4.1.4. Estos resultados están de acuerdo con los encontrados por distintos autores, que han demostrado que mientras las ondas coro se distribuyen esencialmente en el sector del amanecer, los flujos de partículas en múltiples niveles de energía se distribuyen en todos los valores de MLT (Shue et al., 2015; Ni et al., 2016).

3.2.2. Geostationary Environment Satellites (GOESs)

Los satélites “Geostationary Operational Environmental Satellites” (GOES) son una serie de satélites mantenidos por NASA y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que están diseñados para predecir eventos de clima local, como tornados, huracanes, inundaciones repentinas y otros eventos extremos. Estos satélites proveen mediciones que permiten la investigación y desarrollo del Clima y Clima Espacial. Los satélites GOES se desplazan en órbita circular geosíncrona por sobre el Ecuador Geográfico a una altura aproximada de 35790 km.

El primer satélite experimental fue el ATS-1 (Applications Technology Satellite) lanzado en 1966, que era capaz de tomar imágenes continuamente y transmitir las hacia la Tierra. En la actualidad posee cuatro satélites en operación (GOES 14, 15, 16 y 17).

En este trabajo se utilizaron mediciones de los satélites GOES, específicamente flujos de electrones relativistas en energías > 2 MeV. Debido a las asimetrías en el Campo Magnetosférico, el flujo de electrones medido cerca del mediodía/atardecer local es mayor que el flujo medido durante la noche (Onsager, 2004). Los sensores de GOES miden con una cadencia de 5 minutos por lo que son capaces de detectar estas asimetrías. Miden específicamente flujos direccionales integrados para energías > 2 MeV. Dado que el objetivo del trabajo es estudiar variaciones día a día, con los datos de GOES se generó una serie diaria de valores de Fluencia, sumando todos los valores dentro del día. La serie comprende desde el mes de junio de 1987 hasta el mes de diciembre de 2009.

Para generar dicha serie se utilizaron datos de distintos satélites GOES, que son GOES 7, 8, 9, 11, y 12. En la Tabla 3.2 se muestran las fechas de inicio y fin entre las cuales se recopilaban los datos de cada satélite. Los satélites son referidos como GOES-East o GOES-West cuando se encuentran a una Longitud Geográfica de 75° W o 135° W respectivamente.

Satélite	Fechas de inicio y fin	Posición (East o West)
GOES 7	Junio de 1987 a Febrero de 1995	GOES-East/West
GOES 8	Marzo de 1995 a Marzo de 1996 y agosto de 1998 a Marzo de 2003	GOES-East
GOES 9	abril de 1996 a julio de 1998	GOES-West
GOES 11	enero-febrero de 2008, diciembre de 2008 y enero-diciembre de 2009	GOES-West
GOES 12	abril de 2003 a diciembre de 2007 y marzo-noviembre de 2008	GOES-East

Tabla 3.2. Datos satelitales para los estudios de esta sección.

Esta información también se muestra en la Tabla. Notar que GOES 7 estuvo inicialmente a 75° W (GOES-East), luego en otras longitudes intermedias y terminó en 135° W (GOES-West) en el final del período de recopilación de los datos para este estudio (Lam, 2017).

La secuencia resultante cubre los Ciclos Solares 22 y 23 completos. A lo largo de estos dos ciclos, los satélites estuvieron ubicados como GOES-East durante la fase ascendente y el máximo del Ciclo Solar 22. Luego, en la fase descendente de este ciclo estuvo en etapa de transición entre GOES-East y GOES-West. En el Ciclo Solar 23, llegando a la fase máxima de este ciclo, la ubicación es GOES-East, pero cambia a GOES-West hacia la fase descendente y mínima.

Dado que el eje dipolar está más inclinado hacia la dirección de GOES-East que de GOES-West, ambas configuraciones operan en latitudes magnéticas distintas, con GOES-East alrededor de 11° N del Ecuador Magnético y GOES-West a 4° N aproximadamente. Por lo tanto, los satélites miden flujos a distintos valores de L. Onsager (2004) demostró que los flujos de GOES-West miden consistentemente flujos más altos que GOES-East porque el flujo decrece con los valores de L en las cercanías a órbitas geosíncronas. Meredith et al. (2015) estimó que las diferencias se dan en un factor de 2.5 que resultan despreciables en las intensidades que alcanza la Fluencia de electrones de GOES que está en el orden de $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Además, con un set de datos de 23 años, las pequeñas diferencias en los niveles de flujo debido a la ubicación de los satélites ubicados como GOES-East o GOES-West pueden ser despreciadas en los análisis estadísticos de este trabajo.

3.2.3. Solar, Anomalous, Magnetospheric Particle Explorer (SAMPEX)

“Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer” (SAMPEX) fue un satélite de órbita baja (600 km de altura) y polar (82° de inclinación), lanzado por NASA el 03/07/1992 y que tuvo una duración de 11 años y 27 días tomando datos por más de un ciclo solar. El objetivo fue medir tres tipos de partículas: rayos cósmicos, partículas energéticas solares y electrones magnetosféricos. Para hacerlo, llevaba a bordo cuatro instrumentos, uno de los cuales permitía medir electrones relativistas y cuyos datos fueron utilizados en este trabajo. Este instrumento es “Proton/Electron Telescope” (PET). Se utilizaron mediciones calibradas de flujo de electrones de PET en dos rangos de energía: 3.75 y 8.25 MeV. La Figura 3.10 presenta la serie completa de flujo de electrones de SAMPEX-PET en 3.75 MeV en función de L de McIlwain y del tiempo. Los flujos se muestran suavizados con un promedio móvil

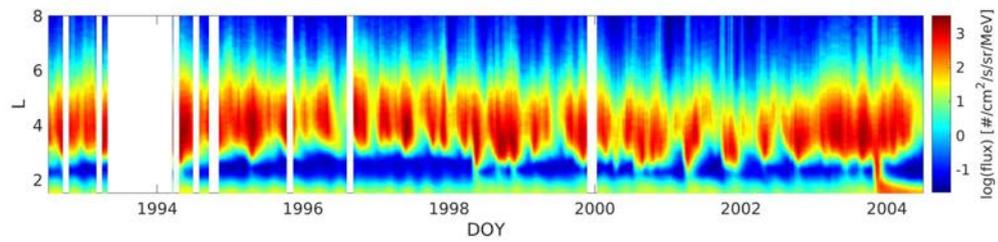


Figura 3.10. Serie completa de flujo de electrones de SAMPEX-PET en 3.75 MeV en función de L de McIlwain y del tiempo utilizada en este trabajo.

de 30 días de longitud. La serie muestra varios intervalos con datos faltantes, en especial en los años 1993 y 1994. Sin embargo, para el proceso de superposición que se utilizará en el Capítulo 5.1, se puede garantizar que los gaps no se dan de forma sistemática en alguna época del año y que cada DOY posee no menos de diez valores correspondientes a distintos años.

En (Baker & Blake, 2013) se destacan los avances que se lograron en el entendimiento de la dinámica de medio y largo plazo de los electrones magnetosféricos relativistas gracias a SAMPEX. En particular, en el entendimiento de la Variación Semianual en estos electrones, que es de interés en este trabajo.

Síntesis de observaciones utilizadas

La Tabla 3.3 presenta una síntesis de todas las observaciones utilizadas en este trabajo. Se incluyen también los instrumentos o experimentos principales para su medición y la cobertura temporal. Los detalles se encuentran en las secciones previas de este capítulo. En todos los casos los valores utilizados fueron valores diarios. Los datos del campo magnético local utilizados para derivar ondas coro fueron también tomados de EMFISIS. Los datos del campo no son listados en esta tabla porque es una cantidad utilizada indirectamente para el cálculo de otra.

Datos Satelitales			
Tipo	Misión	Experimento o sensor	Cobertura temporal
Fluencia	GOES	Sensores de >2 MeV	junio 1987 - diciembre 2009
Flujo de electrones	RBSP	REPT, MagEIS y HOPE	2013 - 2018 completos
Flujo de electrones	SAMPEX	PET	1992 - 2004 completos
Flujos de H^+	RBSP	RBSPICE	2013 - 2018 completos
Flujos de O^+	RBSP	RBSPICE	2013 - 2018 completos
Flujos de He^+	RBSP	RBSPICE	2013 - 2018 completos
Ondas Coro	RBSP	EMFISIS	2013 - 2018 completos
Datos Geomagnéticos			
Tipo	Red	Instrumentos	Cobertura temporal
Ondas Pc5	CANMOS	Magnetómetros fluxgate	junio 1987 - diciembre 2009

Tabla 3.3. Síntesis de todas las observaciones utilizadas en este trabajo.

Capítulo 4

Variación Semianual en electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior

Mientras el Cinturón de Radiación interno comprendido principalmente por protones, suele ser relativamente estable, el Cinturón Exterior es muy dinámico y varía en múltiples escalas temporales. En este cinturón se alojan electrones con energías en los MeV que son objeto de estudio en este capítulo. El estudio de la Variación Semianual en este cinturón se desarrolló utilizando datos de RBSP Y SAMPEX, pero también se analizaron mediciones de electrones relativistas en órbita geosíncrona utilizando datos de la misión GOES.

La variabilidad de los electrones relativistas en el Cinturón Externo de Radiación es el resultado de procesos de aceleración y de pérdida de electrones. Los múltiples procesos de aceleración de electrones pueden ser agrupados a grandes rasgos en dos grandes grupos: procesos de difusión radial y procesos de aceleración local.

La difusión o transporte radial toma una población a una determinada distancia de la superficie terrestre y la transporta hacia adentro, violando el tercer invariante adiabático. La energización ocurre por aceleración betatrón o Fermi porque el electrón conserva el primer y segundo invariante adiabático y se mueve hacia regiones de campo magnético más intenso. Esto puede darse, por ejemplo por un proceso de difusión por ondas de muy baja frecuencia (Ukhorskiy et al., 2005).

La aceleración local en cambio, involucra el aumento de energía de electrones in situ (en la misma ubicación radial) porque se rompe el primer y segundo invariante adiabático por procesos de resonancia con ondas magnetosféricas. Este tipo de aceleración está comunmente asociado con distintos tipos de ondas como las denominadas ondas coro (Summers et al., 1998; Reeves et al., 2013; Thorne et al., 2013).

En este capítulo, se evalúan también distintos elementos que intervienen en la aceleración de los electrones ya sea por difusión radial o por aceleración local. En primer lugar, se evalúan ondas coro magnetosféricas, poblaciones fuente y semilla de electrones que intervienen en procesos de aceleración local. En segundo lugar, se evalúan ondas Pc5 que intervienen en

procesos de difusión radial.

4.1. Características en el dominio tiempo-L y dependencia energética

4.1.1. Distribución en el tiempo y en L

Los gráficos de los paneles (b)-(h) de la Figura 4.1 muestran los flujos de electrones de RBSPa en un diagrama año vs L para las siguientes canales de energía: 108, 597 y 909 keV proveniente de MagEIS y para los canales 1.8, 3.4, 5.2 y 6.3 MeV de REPT. L es el parámetro de McIlwain's para un ángulo de inclinación con respecto al campo magnético local de 90° determinado con el modelo magnetosférico de Olson & Pfizter OP77Q (ver Sección 3.2.1). Cada bin corresponde a un $\Delta L = 0.01$ y $\Delta t = 1$ día del año (DOY) y contiene el valor correspondiente al logaritmo decimal de los flujos. Las regiones en blanco corresponden a los valores filtrados, quitando valores de fondo que no corresponden a mediciones reales, sino a los valores por defecto que entrega el sensor (ver Sección 3.2.1 Pag. 41).

Los flujos se muestran para $L \geq 2.5$ en el caso de los datos de REPT debido a un resultado fundamental que se obtuvo a partir de la misión RBSP: el cinturón interno de Van Allen prácticamente no contiene electrones con energías ≥ 1.5 MeV (Fennell et al., 2015; Li et al., 2015). Baker et al. (2016) demostró que el cinturón externo de radiación encuentra una barrera interior en $L \simeq 2.8$ y prácticamente no hay electrones con $E \geq 2.5$ MeV dentro de esta región en las horas y días posteriores a eventos extremos, momentos en los cuales ocurren procesos de aceleración y/o inyección de partículas. La barrera interna en $L = 2.8$ tiene importantes consecuencias para el Clima Espacial dado que cualquier dispositivo que se mueva entre $L = 2.5$ y 2.8 está protegido entre otros efectos, de los producidos por la carga interna, asociado los electrones relativistas.

Por el contrario, los canales de energía de MagEIS son graficados para $L \geq 1.2$ con el objeto de mostrar que los electrones menos energéticos si pueden ser inyectados al cinturón de radiación interno y además que cuanto menor es la energía, mas frecuentes son estas inyecciones. Se puede notar por ejemplo que en el panel de 108 keV el cinturón interior es bastante estable en el tiempo.

La Figura 4.1(a) muestra la progresión de los promedios mensuales del índice F10.7 correspondiente a los años de medición de RBSP, que coinciden con el máximo de actividad solar del Ciclo Solar 24 y su fase descendente. El máximo de F10.7 fue alcanzado en 2013-2014 y fue particularmente bajo comparado con ciclos solares previos (Svalgaard, 2005). En los paneles con los flujos de electrones, desde finales de 2013 hasta la primera parte de 2015 estos fueron mínimos en comparación con otros períodos. Particularmente, en los canales 5.2 y 6.3 MeV los flujos desaparecen a mediados de 2014. Los máximos se alcanzan 2-3 años después en la fase descendente del ciclo.

El contenido de electrones del Cinturón Externo ha sido correlacionado previamente con el Viento Solar, específicamente con la velocidad del viento, mostrando que cuando $u \gtrsim 500$

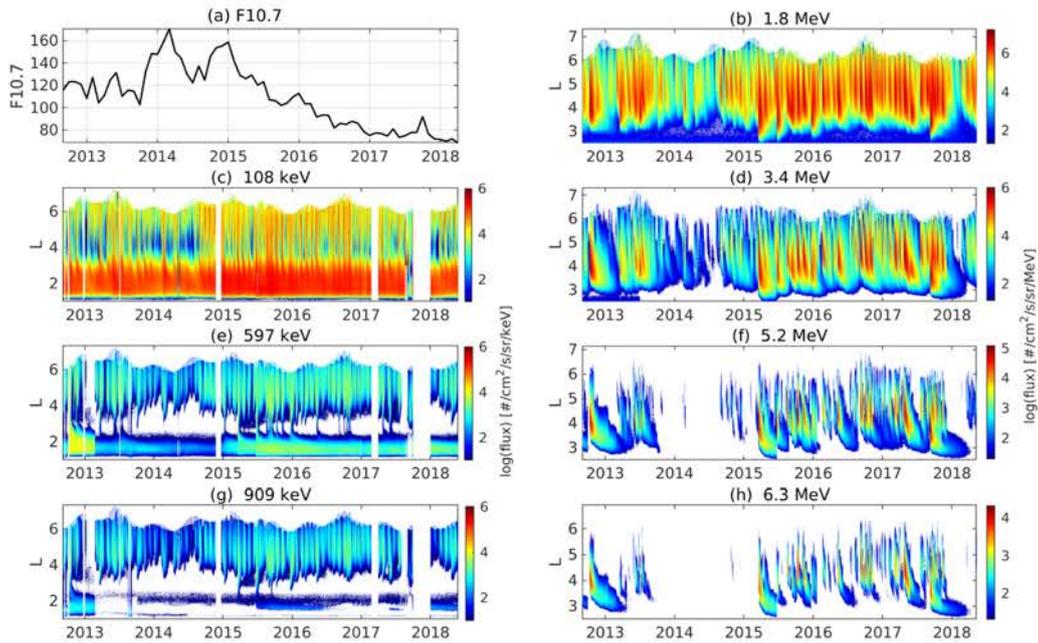


Figura 4.1. (a) Índice F10.7 promediado mensualmente en unidades de sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). (c), (e) y (g) Series de flujo de electrones de MagEIS hasta Mayo de 2018 medidos por RBSPa. Los canales de energía mostrados son 470, 597, y 909 keV. (b), (d), (f) y (h) Series de flujo de electrones de REPT hasta Mayo de 2018. Las energías son: 1.8, 3.4, 5.2 y 6.3 MeV. L es el parámetro de McIlwain para un ángulo de inclinación con respecto al campo magnético local de 90° de los electrones relativistas.

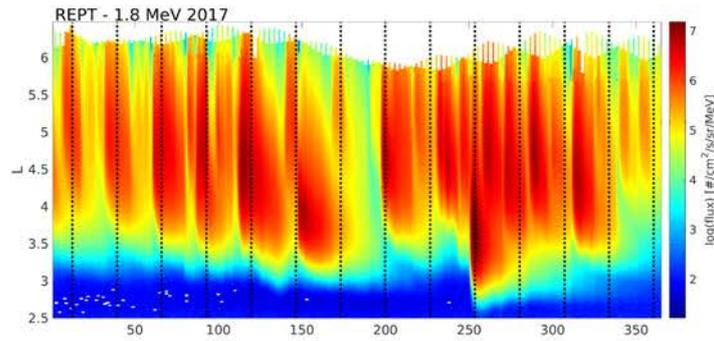


Figura 4.2. Mediciones de flujo de electrones representadas en un gráfico día del año (DOY) vs L para el año 2017 y 1.8 MeV. Los datos corresponden a ECT-REPT a bordo de RBSPa. Las líneas negras punteadas están separadas entre ellas por 27.2 días (período sinódico de rotación solar). Se ven claros crecimientos y decrecimientos cada ~ 27 días.

km s^{-1} el contenido de electrones es mayor y cuando $u \lesssim 300 \text{ km s}^{-1}$ persistentemente, el flujo de electrones con $E \gtrsim 1 \text{ MeV}$ prácticamente desaparece (Baker et al., 2004).

En la Figura 4.2 se muestran los flujos del canal 1.8 MeV de RBSPa para 2017. Las líneas punteadas verticales están separadas 27.2 días entre ellas, que corresponde al período sinódico de rotación del Sol (Sección 2.2.1). La característica más notable de esta figura son los aumentos y disminuciones que surgen repetidamente cada 27 días aproximadamente, que evidencia el efecto sobre los flujos de electrones de las estructuras en el Viento Solar que rotan alrededor del Sol.

4.1.2. Análisis de superposición en DOY-L y dependencia energética

De lo observado en otras variables como la componente H del campo geomagnético, el índice Dst , el contenido total electrónico en la ionosfera, etc., se desprende que la Variación Semianual actúa como una modulación de fondo en la intensidad de un evento específico de la siguiente manera. Si se supone al Viento Solar arribando hacia la Tierra con determinados valores de campo magnético y velocidad en un período cualquiera a lo largo del año causará perturbaciones en un nivel determinado, pero si este evento tiene lugar en una fecha cercana a un Equinoccio, existe una mayor probabilidad de que estas perturbaciones sean mayores que si el evento tiene lugar cerca de un solsticio. Por lo tanto, si se busca determinar un patrón semianual en el flujo de electrones energéticos, es conveniente que los datos sean agrupados según la época del año y calcular promedios para disminuir el ruido y los efectos asociados a eventos particulares, para así analizar sólo la Variación Semianual de fondo. Este concepto fue presentado y ejemplificado utilizando el índice Dst en la Sección 2.9.

Aplicando esta idea, se calculó un año patrón para cada canal de energía, promediando los valores de flujo de los correspondientes bins $(\Delta t, \Delta L)$ para el mismo DOY, mostrados en

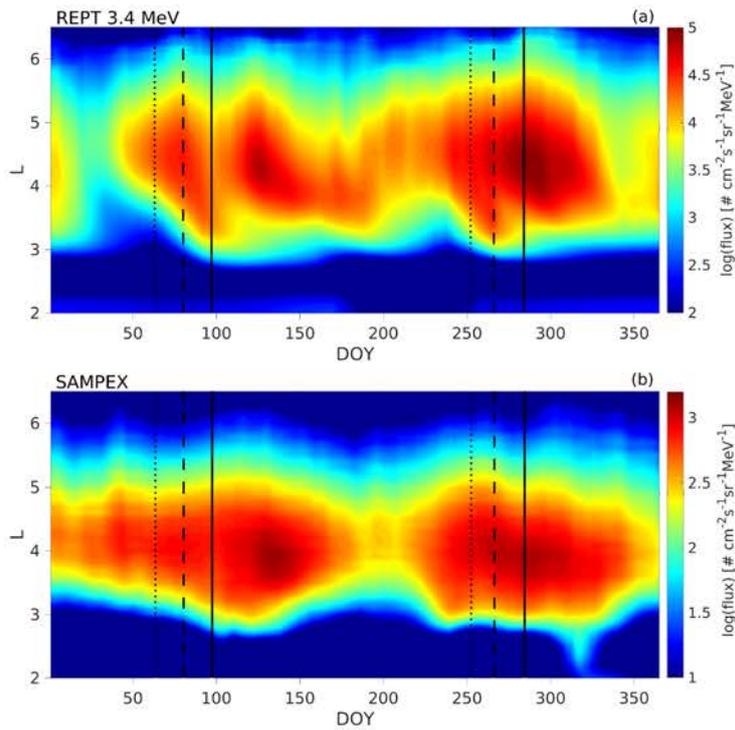


Figura 4.3. Análisis de superposición en época: (a) para los flujos de REPT en 3.4 MeV y (b) para los flujos promediados en dos niveles de energía (3.75 y 8.25 MeV) del instrumento PET de SAMPEX. Las líneas negras verticales están alineadas con los días de los máximos de actividad según las tres hipótesis clásicas de la Variación Semianual: Axial (línea punteada), Equinoccial (línea a rayas) y el efecto de RM (línea sólida)

los paneles (b)-(h) de la Figura 4.1. Luego, se calculó el logaritmo decimal al valor promedio que resulta de la superposición y por último, se aplicó un promedio móvil con una ventana centrada de 30 días de longitud para suavizar al mínimo la variación de 27 días que aparece claramente en los datos, como se evidencia en la Figura 4.2. El resultado puede observarse en la Figura 4.3(a) para el flujo de electrones con $E = 3.4$ MeV de RBSPa . Las tres líneas verticales corresponden a las predicciones de los máximos de las tres teorías clásicas: Axial (línea punteada), Equinoccial (línea a rayas) y el efecto RM (línea sólida), detalladas en la Tabla 2.1.

La Figura 4.3(a) muestra máximos cercanos a los equinoccios en el rango de $L \sim 3.2-5.2$ centrados en $L = 4.2$, que reflejan un patrón semianual claro. El máximo cercano al equinoccio de marzo tiene una estructura de doble pico con su máximo absoluto en el DOY 126 y el máximo correspondiente al equinoccio de septiembre en el DOY 285. En la Figura 4.3(b) se muestran los resultados de aplicar el mismo procedimiento a los datos de SAMPEX. Como es esperado, los valores en el panel superior e inferior alcanzan intensidades distintas, que se evidencia en la escala de colores a la derecha. Esto puede deberse a varios factores, por ejemplo a que ambas misiones miden en ciclos solares distintos. A pesar de esto, el patrón semianual muestra un comportamiento similar en ambos paneles revelado por ejemplo en la ubicación de los máximos. El primer máximo en la Figura 4.3(b) cae sobre el DOY 135 y el segundo en el DOY 288 y en un valor de L inferior, sobre $L \simeq 3.9$.

El segundo máximo para SAMPEX y de REPT se alinea casi exactamente con la predicción de RM. Sin embargo, también se observan valores de intensidad levemente menores alineados con la predicción de la teoría Equinoccial. Pero la característica mas notable de los dos paneles en la Figura 4.3 es que el primer máximo aparece retrasado casi un mes de las predicciones de RM (y mas de las predicciones de las otras dos teorías).

Kanekal et al. (2010) realizaron un análisis similar utilizando 10 años de datos de SAMPEX y obtuvieron también este retraso. Los autores de este artículo sugirieron que la predicción errónea de este máximo podría deberse a la falta de datos, y que una secuencia mas larga podría mejorar la media estadística y alinear el máximo con la predicción de alguna de las tres teorías. Sin embargo, los resultados presentados aquí indican que este fenómeno estaría relacionado a una asimetría en los procesos físicos que energizan los electrones cerca del equinoccio de marzo y de septiembre respectivamente y no con un ciclo solar particular o con la longitud de las observaciones. Vale la pena destacar que la Figura 4.3(a) muestra también valores altos alineados con la teoría equinoccial.

Los resultados para los distintos canales de energía de RBSPa para MagEIS y REPT pueden ser observados en la Figura 4.4. Para los canales de REPT, la variación semianual es evidente, pero para los canales de MagEIS, los máximos son difícilmente reconocibles.

Dependencia de la Variación Semianual con los niveles de energía

Es esta sección se analiza la Variación Semianual en el flujo de electrones para un amplio rango de energías. El criterio para establecer si la Variación Semianual está presente o no

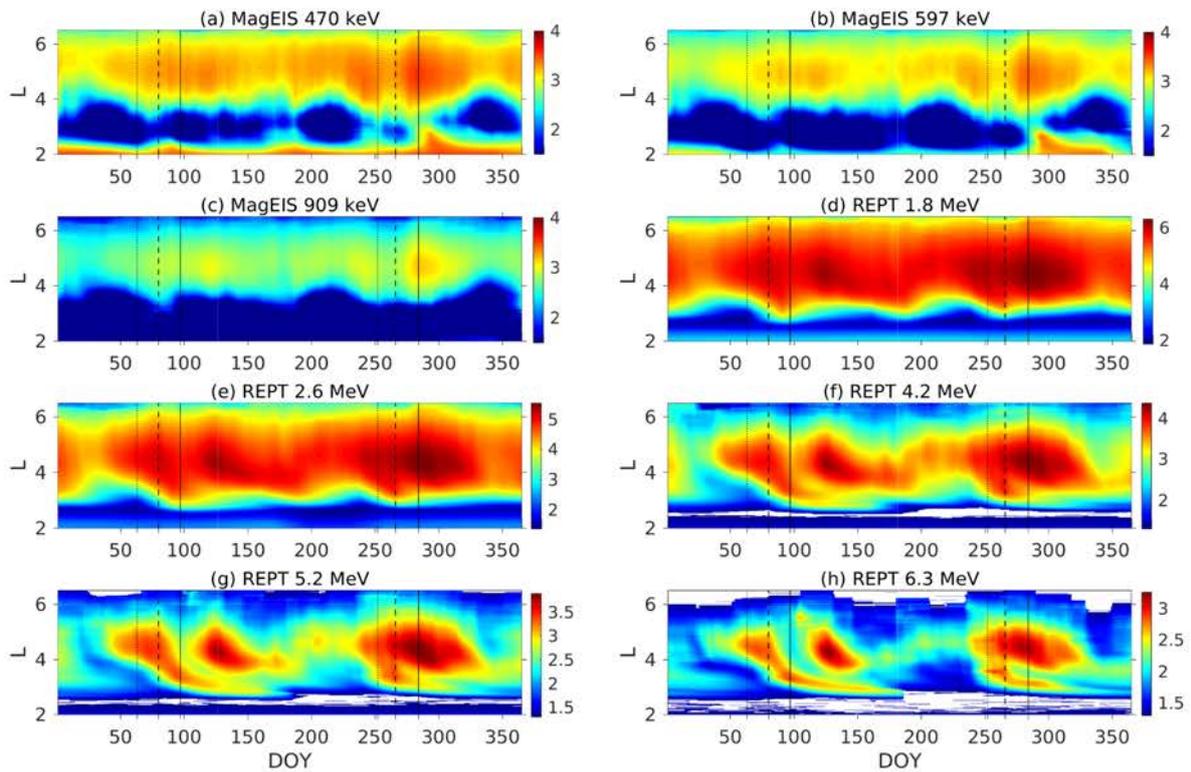


Figura 4.4. Análisis de superposición en época: (a)-(c) para los flujos de electrones de MagEIS en los canales 470, 597 y 909 keV. (d)-(h) para los canales de REPT en 1.8, 2.6, 4.2, 5.2 y 6.3 MeV. Las mismas tres líneas verticales de la Figura 4.3 fueron agregadas en cada panel. Las escalas de colores están en unidades de $\log \# \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$.

4. Variación Semianual en electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior

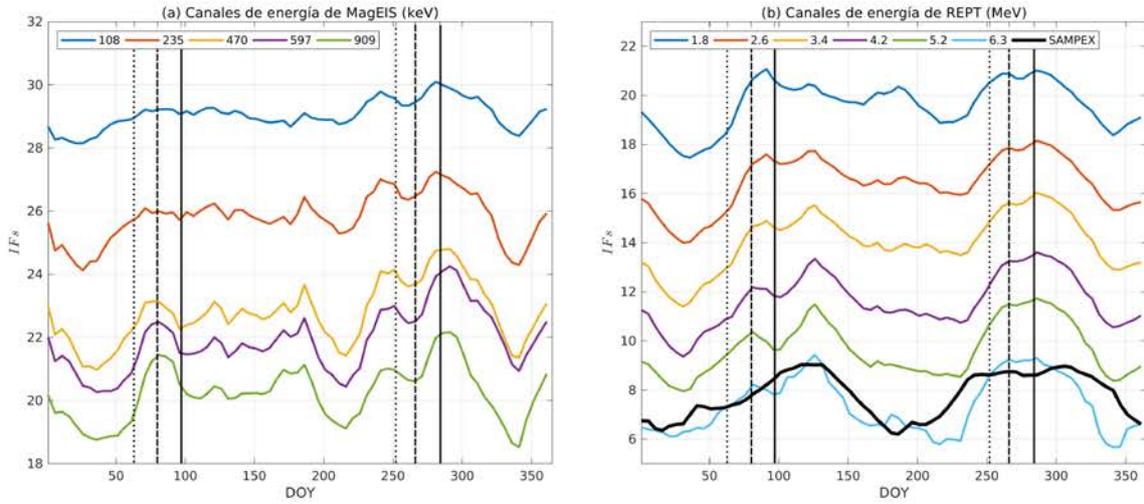


Figura 4.5. Curvas IFs calculadas con la Ecuación (4.1) para los flujos de SAMPEX, REPT y MagEIS de RBSPa en los canales de energía utilizados en esta Sección. El panel izquierdo muestra las curvas IFs calculadas con datos de MagEIS y el panel derecho las calculadas con datos de SAMPEX y REPT. Para la curva de SAMPEX, se utilizaron flujos promediados en dos niveles de energía (3.75 y 8.25 MeV) del instrumento PET. Las unidades de las curvas son $\log \# \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$.

fue calcular cuán diferente son, en promedio, los flujos de electrones en los equinoccios y los solsticios. Para esto, se integró en L los flujos mostrados en las Figuras 4.3 y 4.4 para cada canal de energía, utilizando la siguiente aproximación:

$$IFs(\text{DOY}) = \Delta L \sum_{L=2.5}^{6.5} Fls(\text{DOY}, L), \quad (4.1)$$

donde $Fls(L, \text{DOY})$ representa los flujos de la Figura 4.3 y IFs es la curva resultante en el tiempo. De este modo, IFs es una secuencia temporal anual que considera los flujos de electrones en todo el cinturón de radiación externo. Notar que integrando en $L \geq 2.5$ no consideramos el cinturón interior que contiene flujos altos para canales con energías ≤ 600 keV. Para el caso de SAMPEX $\Delta L = 0.1$ y para RBSP $\Delta L = 0.01$.

Las curvas IFs son mostradas en la Figura 4.5 para cada canal de energía de los flujos de REPT/MagEIS y de SAMPEX y varias características pueden ser identificadas. La primera es que la Variación Semianual es evidente en todos los canales de energía de REPT y SAMPEX (panel derecho) pero es difícilmente reconocible en los canales de MagEIS (panel izquierdo). Además, el patrón semianual se vuelve progresivamente menos reconocible a medida que la energía del canal disminuye. Por ejemplo, en las curvas correspondientes a los canales en 4.2 y 5.2 MeV los valores en el primer equinoccio son casi dos órdenes de magnitud mayores que en los solsticios. Para las curvas de los canales en 909 keV y 1.8 MeV los valores cerca del

Tabla 4.1. Intervalos que comprenden aproximadamente tres meses de valores diarios.

Intervalo	DOYs (RM)
EQ1	51-139
SL1	140-231
EQ2	232-323
SL2	1-50, 324-365

equinoccio de marzo no son muy distintos a los valores en el solsticio de junio y el patrón semianual se vuelve irreconocible en 108 keV.

Otra característica interesante surge de analizar la ubicación de los máximos en los distintos canales. Para el primer máximo semianual, empezando con los canales mas altos de REPT, puede verse que se desplazan desde el DOY 126 en 6.3 MeV hasta el DOY 91 para 1.8 MeV. Si bien el patrón semianual no puede identificarse claramente en las curvas de los canales de MagEIS, el pico en DOY 91 permanece con valores altos y se desplaza al DOY 85 para cada una de las curvas del panel izquierdo. el pico en el DOY 85 representa una mejor predicción considerando las fechas de los máximos predichos por las tres teorías clásicas. El segundo máximo semianual se observa claramente en los dos paneles y se alinea muy bien con la predicción de RM.

La curva IFs correspondiente a los datos de SAMPEX muestran características similares a IFs de REPT en 6.3 MeV.

Para evaluar mas precisamente la dependencia con la energía de la Variación Semianual se siguió el siguiente procedimiento. Los 365 valores de cada curva IFs en el rango 108 keV y 6.3 MeV se agruparon en cuatro intervalos: EQ1, SL1, EQ2 y SL2. Estos intervalos están detallados en la Tabla 4.1. Cada intervalo comprende tres meses de valores diarios de las curvas IFs y fueron diseñados de modo que los días del año de los máximos predichos por la hipótesis RM (97 y 284) caigan en el centro de EQ1 Y EQ2. Cada intervalo comprende aproximadamente las estaciones completas pero con un retraso en la alineación con respecto a los equinoccios y solsticios nominales. Luego, se calculó IFs_i , que es el valor promedio de IFs en cada intervalo ($i = EQ1, SL1, EQ2, SL2$).

La Figura 4.6(a) muestra el resultado de calcular el siguiente valor:

$$100 \left(\frac{\overline{IFs}_i}{\overline{IFs}} - 1 \right), \quad (4.2)$$

para el canal en 5.2 MeV. \overline{IFs} es el promedio de IFs utilizando los 365 valores. La Ecuación (4.2) representa la desviación porcentual de cada \overline{IFs}_i sobre el promedio anual. Esta figura muestra que la desviación para EQ1 es menor que para EQ2, y lo mismo ocurre con SL1 y SL2, el apartamiento del valor promedio anual de SL2 es mayor que el de SL1. La diferencia máxima es de $\sim 23\%$ entre EQ2 y SL2.

Para estimar la diferencia promedio entre intervalos de equinoccios EQ1 y EQ2 y de solsticios SL1 y SL2, los valores de \overline{IFs}_i en EQ1 y EQ2 fueron promediados por un lado y

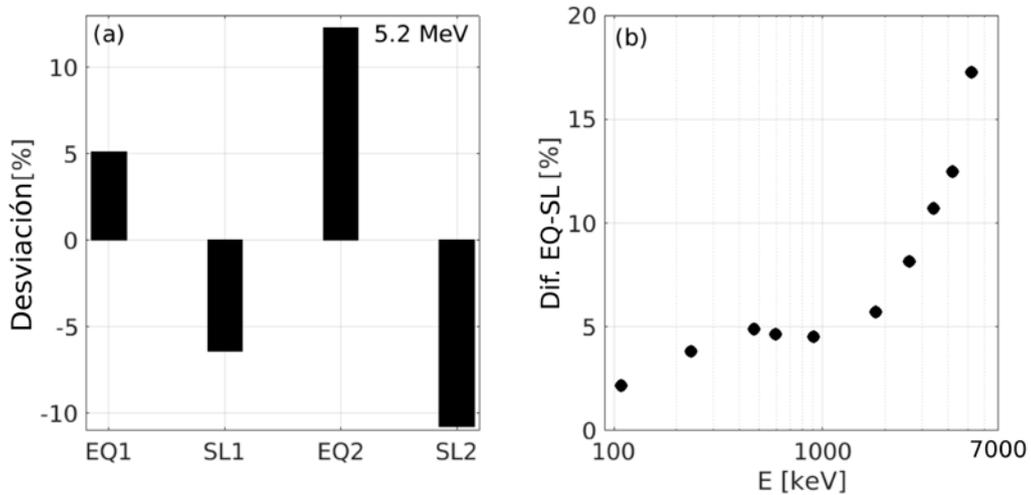


Figura 4.6. (a) Desviaciones del promedio anual de los cuatro valores estacionales IFs_i para 5.2 MeV. (b) Diferencia del valor promedio de IFs_i entre los intervalos de los equinoccios EQ1 y EQ2 y los intervalos de los solsticios SL1 y SL2 para cada canal de energía de este trabajo.

los de SL1 y SL2 por otro. Luego se restaron ambos valores. El resultado para el canal 5.2 MeV mostrado en la Figura 4.6(a) fue de $\sim 17\%$, que es menor a la estimación pico a pico de $\sim 23\%$, mencionada anteriormente. Esta estimación fue extendida para todos los canales de energía mencionados anteriormente (entre 108 keV y 6.3 MeV) y el resultado puede observarse en la Figura 4.6(b).

Desde ~ 100 keV hasta 909 keV (el último valor en el rango de los keV), las diferencias están por debajo del 5%. Este es el rango de energías correspondiente a las mediciones de MagEIS, en donde las curvas IFs mostradas en la Figura 4.5(a) no muestran ningún patrón semianual. Con este análisis adicional, puede inferirse que por debajo del rango de los MeV, es decir en los keV no se observa una Variación Semianual clara en los flujos de electrones energéticos del cinturón exterior de Van Allen. Si se miran energías superiores, la Figura 4.6(b) muestra que las diferencias en los primeros canales de energía en MeV empiezan a crecer, hasta alcanzar rápidamente un máximo de $\sim 17\%$ en 6.3 MeV. Estas energías presentan un patrón semianual reconocible, como se pudo observar en las curvas IFs de la Figura 4.5(b). Para energías superiores hay muy pocos eventos en los que los flujos de electrones se vean considerablemente aumentados como para considerarlos en este análisis.

Estos resultados muestran que la Variación Semianual en el flujo de electrones del cinturón exterior de radiación está confinado sólo a una estrecha porción del espectro de energías: en los MeV hasta los ~ 6 MeV.

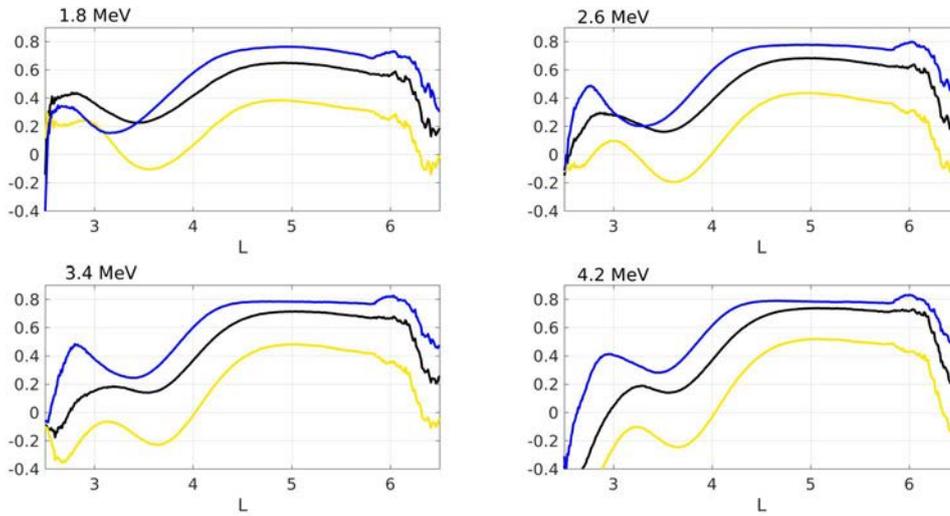


Figura 4.7. Coeficiente de correlación entre los patrones semianuales de los ángulos de las tres teorías clásicas (ver Figura 2.21) y el logaritmo decimal de las curvas que resultan al dejar fijo L en las superficies de la Figura 4.4. Se muestra el caso de cuatro canales de energía de REPT: 1.8, 2.6, 3.4 y 4.2 MeV. La curva de color amarillo, azul y negra corresponden a la correlación con los patrones semianuales de ψ (Axial), θ (hipótesis RM) y ϕ (Equinoccial) respectivamente.

4.1.3. Comparación con patrones de teorías clásicas

Si bien la Variación Semianual en los electrones es encontrada principalmente en un rango acotado de energías en el orden de los MeV, esto no ocurre para L, ya que es evidente en un amplio rango. Las Figuras 4.3 y 4.4 permiten comprobar este hecho. Para estudiar esta variación en L se puede reducir esta dimensión como se hizo en la Sección 4.1.2 al estudiar la dependencia energética. Otra alternativa es estudiar los perfiles a L fijo. En esta sección se sigue esta última estrategia para comparar la Variación Semianual en los flujos de electrones relativistas con las predicciones de las tres teorías clásicas introducidas en la Sección 4.2.3.

La Figura 4.7 muestra el resultado de correlacionar el módulo de los ángulos suavizados (los patrones semianuales) que gobiernan las tres teorías mostrados de la Figura 2.21 con el logaritmo decimal de las curvas que resultan al dejar fijo L en la Variación Semianual mostrada por las superficies de la Figura 4.4. Se calculó el coeficiente de correlación considerando los perfiles entre $L = 2.5$ hasta $L = 6.5$ para cuatro canales de energía de REPT: 1.8, 2.6, 3.4 y 4.2 MeV. La curva de color amarillo, azul y negra corresponden a la correlación con los perfiles semianuales de ψ (Axial), θ (hipótesis RM) y ϕ (Equinoccial) respectivamente. Los valores de correlación con el patrón semianual de ϕ han sido cambiados de signo para facilitar la visualización (notar que en la Figura 2.21 el perfil semianual de ϕ está invertido dando correlaciones negativas en este análisis).

Los cuatro canales muestran que la hipótesis de RM posee los valores de correlación mas

altos en todo el rango de L , a excepción del canal 1.8 MeV para $L \lesssim 3.4$. Para todo el intervalo $L \simeq [3.5, 6]$ se dan los máximos, que se mantienen en ~ 0.8 . Una característica interesante es lo que sucede con esta curva para todos los canales excepto 1.8 MeV en $L \sim 6$ en donde se da el máximo valor de correlación. Estos valores de L corresponden a órbita geosíncrona y es donde las sondas RBSP alcanzan el apogeo. Es posible que la Variación Semianual sea mas evidente en los flujos detectados en órbita geosíncrona y que por eso presente la correlación mas alta. Yendo en esta dirección, se presenta el análisis utilizando datos de la misión GOES en la Sección 4.2.

Las curvas de correlación correspondientes a la hipótesis Equinoccial muestra características similares a la de RM, con altos valores de correlación en el mismo rango de $L \simeq [3.5, 6]$ y sin el pico en $L \sim 6$. La curva de la hipótesis Axial en cambio, muestra valores menores.

Es interesante relacionar los resultados de esta Sección con el escenario propuesto por Baker et al. (1999), que sugiere que la Variación Semianual en los electrones energéticos podría ser el resultado de una combinación de efectos de la teoría Equinoccial y la teoría de RM. La propuesta de Baker y colaboradores tiene un primer elemento, que son los electrones en energías subrelativistas, entre las decenas y cientos de keV que pueblan la Magnetocola y luego la magnetosfera y se inyectan por subtormentas geomagnéticas. Las subtormentas son el resultado de un forzante externo, típicamente una amplificación de la componente B_z^{GSM} del IMF. El segundo elemento en este escenario son los electrones relativistas ($\gtrsim 1$ MeV) que resultan de la aceleración de los electrones previamente inyectados. El efecto de Boller-Stolov (ver Sección 2.9.1) podría ocupar un rol importante en acelerar los electrones con un patrón semianual. De acuerdo con la Sección 4.1.2 las poblaciones de electrones subrelativistas muestran diferencias bajas entre los valores que toman cerca de los equinoccios con respecto a los que toman cerca de los solsticios lo que implica que no presentan Variación Semianual. Por lo tanto, la Variación Semianual parece estar presente solo en una de las dos poblaciones de electrones planteadas en el escenario de Baker et al..

4.1.4. Variación Semianual en elementos generadores de electrones relativistas

Los eventos de aceleración local de electrones hasta energías en los MeV se producen de la siguiente manera. Un forzante externo, por ejemplo una amplificación de la componente B_z^{GSM} del IMF inyecta una cantidad considerable de energía que se aloja en la magnetocola y que luego, una hora después aproximadamente, desencadena el inicio de subtormentas (Akasofu, 1964). Las subtormentas están acompañadas casi invariablemente de la inyección de electrones de mediana energía en la Magnetosfera Interna (región de la magnetosfera con líneas de campo magnético que nacen y se cierran sobre el dipolo). A esta población de electrones en los ~ 1 keV se la denomina “electrones fuente”.

Como se describe en (Thorne et al., 2013), los electrones fuente se distribuyen anisotrópicamente con respecto al campo magnético local, lo que permite la generación de ondas electromagnéticas en frecuencias de ~ 100 Hz - 10 kHz denominadas “ondas coro” (por su

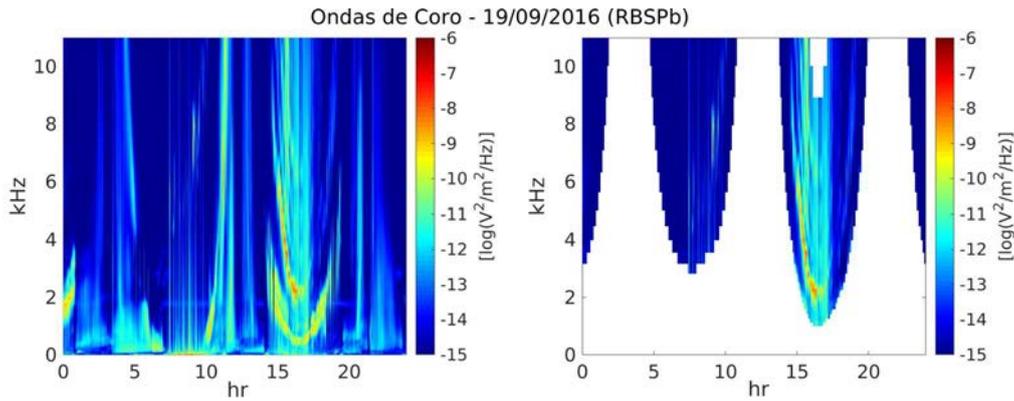


Figura 4.8. Panel izquierdo: Espectrograma tomado de EMFISIS para la sonda RBSPb y el día 19/09/2016. Panel derecho: Espectrograma filtrado (ondas coro), eliminando valores fuera del rango de frecuencias $[f_e/10 - f_e]$, dónde f_e es la frecuencia ciclotrón del electrón.

denominación en inglés “chorus waves”). Estas ondas interactúan por medio de procesos de resonancia con electrones mas energéticos, en el rango $\sim 30 - 300$ keV que también son inyectados por subtormentas y que se los conoce como “electrones semilla”.

Por efecto Doppler, las ondas coro alcanzan frecuencias comparables a la frecuencia de giro de los electrones semilla alrededor de las líneas de campo magnético (frecuencia ciclotrón) y rompen así la condición de adiabaticidad de estos electrones (dada por el primer invariante) y los aceleran a través de procesos de resonancia hasta energías en los los multi-MeV. Este proceso de aceleración es muy eficiente y se produce en minutos u horas (Jaynes et al., 2015).

En este esquema de aceleración, hay tres elementos involucrados: electrones fuente, electrones semilla y ondas coro. Esta sección tiene como objetivo investigar cuál/es de estos elementos posee una Variación Semianual reconocible y cuál/es no. Según los resultados encontrados en la Sección 4.1.2 se puede adelantar que los electrones semilla no poseen ningún tipo de patrón semianual reconocible. El análisis de ondas coro y electrones fuente se describe a continuación.

En el panel izquierdo de la Figura 4.8 se muestra un espectrograma de la componente U del campo eléctrico medido por EMFISIS para un día típico de la sonda RBSPb (ver Sección 3.2.1 para detalles del sistema de coordenadas). Es decir, contiene el espectro de potencia de la autocorrelación de esta componente. Las regiones mas intensas dan cuenta del tipo de ondas presentes en el espectrograma. En (Millan & Thorne, 2007) (ver en particular ver la Figura 4 de este artículo) se ofrece una explicación detallada de los distintos tipos de ondas magnetosféricas que aparecen en espectrogramas de este tipo.

Para obtener una estimación de las ondas coro, se aplicó la misma metodología utilizada en (Jaynes et al., 2014) que consiste en filtrar las ondas en el rango de frecuencias $[f_e/10 - f_e]$, dónde f_e es la frecuencia de ciclotrón del electrón, definida como $f_e = qB/m$, siendo q y m la carga y masa del electrón respectivamente y B el campo magnético local, también tomado de EMFISIS. El resultado del filtrado para el día analizado en la Figura 4.8 se muestra en

4. Variación Semianual en electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior

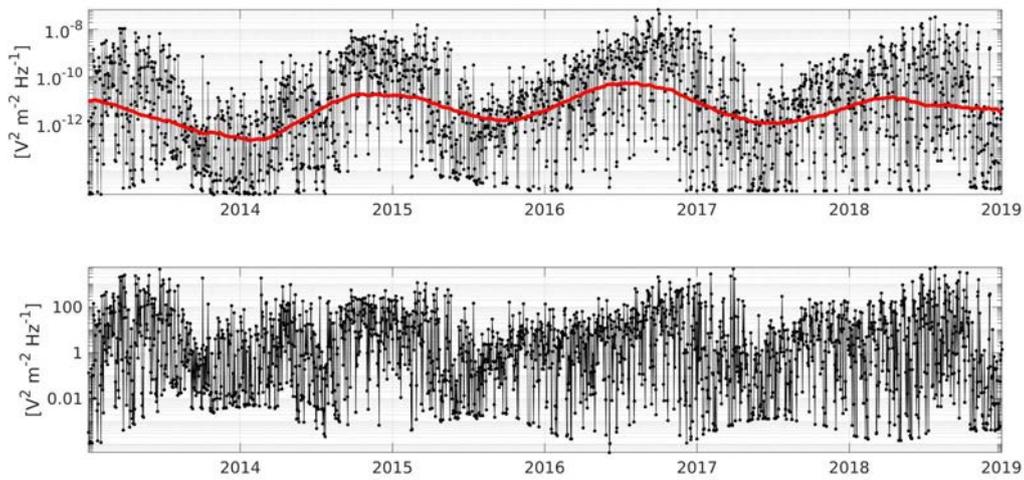


Figura 4.9. Panel superior: Secuencia temporal con los valores diarios máximos de ondas coro. Estos valores son tomados de los espectogramas filtrados, como se ejemplifica en el día de la Figura 4.8. Panel inferior: Secuencia temporal con los valores diarios máximos de ondas coro menos la curva suavizada de dichos valores, que permite eliminar tendencia de ~ 2 años.

el panel derecho de dicha Figura. La región blanca corresponde a los valores excluidos en el filtrado y la región de color muestra la amplitud de ondas coro para ese día.

El procedimiento de filtrado para detectar ondas coro fue extendido a todos los días entre 2013-2018. Si se toma de cada día el valor máximo en la superficie resultante y se grafican estos valores en función del tiempo, se obtienen las curvas del panel superior en la Figura 4.9, en dónde la curva negra representa los valores máximos de cada día en los espectogramas filtrados y la curva roja es la curva negra suavizada con un promedio móvil, utilizando una ventana de 1 año de datos de longitud.

La curva suavizada revela una periodicidad clara de ~ 2 años, que posiblemente esté relacionada con el tiempo que le lleva a las sondas RBSP completar una vuelta. Es decir, el tiempo que le toma en rotar 360° grados a la línea que une el apogeo y el perigeo en la órbita de las sondas (Ver Sección 3.2.1).

Para detectar la Variación Semianual es pertinente quitar esta periodicidad de dos años. Por lo tanto, a los valores diarios máximos de intensidad de ondas de coro (curva negra), se le restó la curva suavizada. La curva resultante de esta resta se encuentra en el panel inferior de la misma figura (Figura 4.9). Si se quiere ser consistente con el procedimiento utilizado para derivar la señal semianual en los flujos de electrones relativistas, se debe realizar la superposición en un año patrón de la curva restada (panel inferior en la Figura 4.9) calculando un valor medio para cada DOY y luego suavizar la curva superpuesta con un promedio móvil utilizando una ventana de 30 días de longitud. Al hacerlo, se obtienen las curvas que se muestran en la Figura 4.10

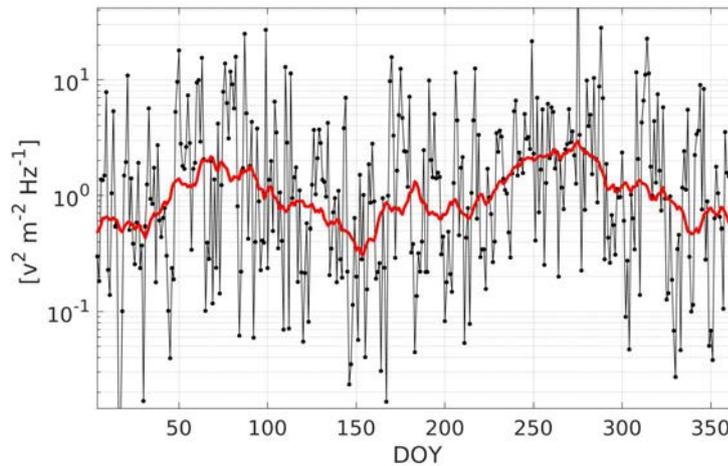


Figura 4.10. Curva negra: Superposición en un año de la secuencia de ondas coro (curva del panel inferior en la Figura 4.9). Curva roja: Curva negra suavizada con un promedio móvil utilizando una ventana de 30 días de longitud.

La curva negra representa la superposición y la curva roja la curva suavizada. Esta última curva muestra un claro patrón semianual con máximos cercanos a los Equinoccios y mínimos cercanos a los Solsticios. Se encuentra entonces que el primer elemento involucrado en la cadena de producción de electrones en energías del MeV posee una Variación Semianual.

Para investigar los elementos restantes se utilizan datos de MaEIS y HOPE. La Figura 4.11 muestra el flujo de electrones en función de L y del tiempo en 2013-2018 para una población de electrones fuente de 15 keV (panel superior), una población semilla de 246 keV (panel central) y una población relativista de 3.4 MeV (panel inferior). Las escalas de intensidades que muestran la variación de los flujos se encuentran a la derecha de cada panel.

Las características de las poblaciones semilla (246 keV) y relativista (3.4 MeV) ya han sido estudiadas en las Sección 4.1.1. En lo que respecta a los electrones fuente (15 keV), estos muestran una serie de inyecciones, mas frecuentes en el tiempo que las otras dos poblaciones y que se extienden en ambos cinturones de Van Allen. Sin embargo, estas inyecciones no cambian de manera significativa el contenido de electrones medio de esta población, ya que, como revela la escala de intensidades, en raras ocasiones los valores están fuera del rango $\sim 5.5 - 6.5 \text{ keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Por lo tanto, el contenido de electrones fuente es mas estable en el tiempo. En (Reeves et al., 2016) se estudia la dinámica de los electrones desde los keV hasta los MeV y se destaca justamente este hecho, es decir, que los eventos de electrones en energías altas aparecen siempre como un subconjunto de los eventos en energías bajas.

Si se realiza el procedimiento de superposición en un año patrón de los flujos de las tres poblaciones de la Figura 4.11 se obtienen los mapas de intensidad mostrados en los paneles (b), (c) y (d) de la Figura 4.12, que corresponden a la población fuente, relativista y semilla respectivamente. En el panel (a) se ha agregado la superposición suavizada de las ondas coro, es decir la curva roja de la Figura 4.10.

4. Variación Semianual en electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior

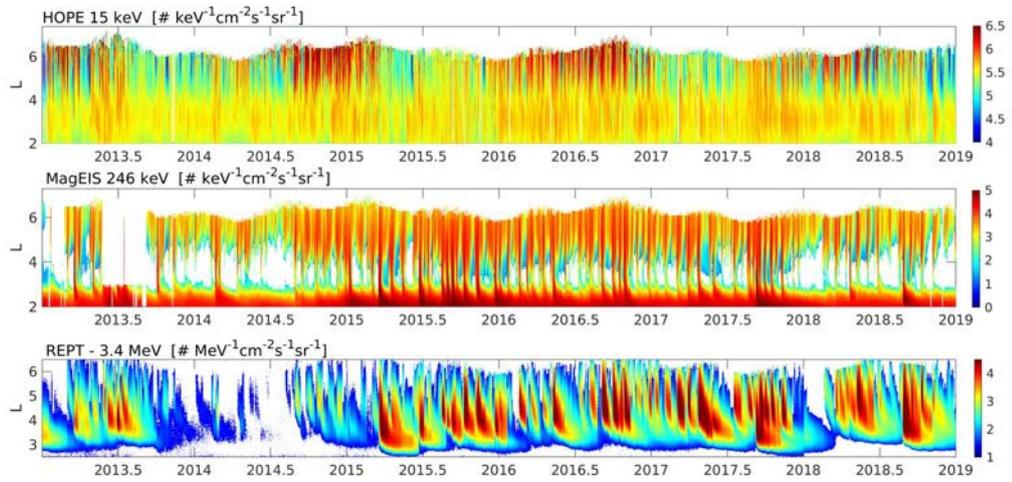


Figura 4.11. Serie temporal para una población de electrones fuente (15 keV), semilla (246 keV) y relativista (3.4 MeV) para 2013-2018.

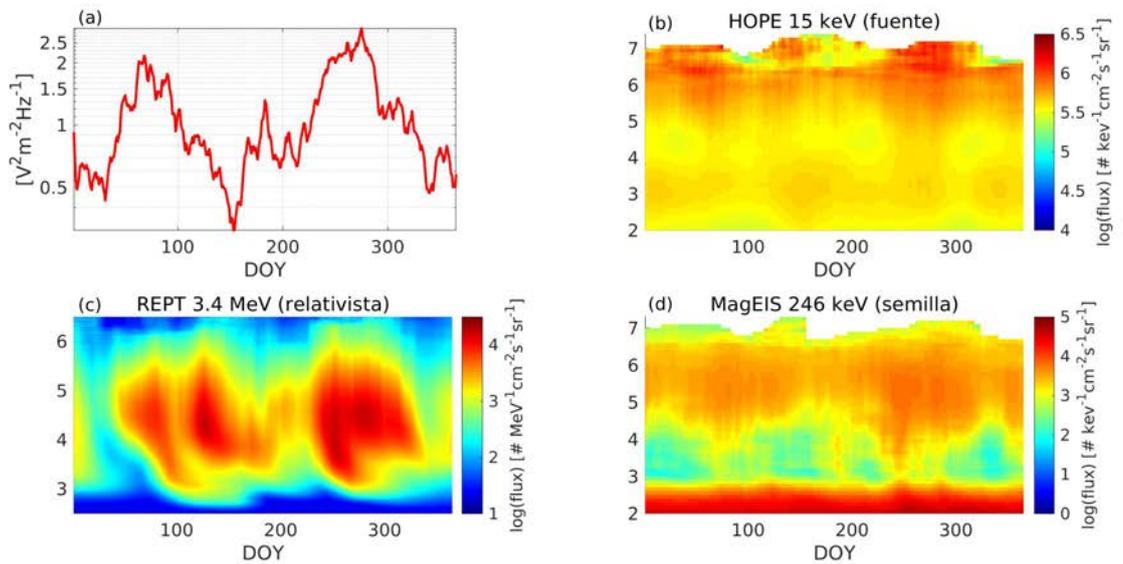


Figura 4.12. (a): Secuencia de ondas coro superpuesta y suavizada. (b): Superposición en un año de los flujos de HOPE en 15 keV. (c): Superposición en un año de los flujos de REPT en 3.4 MeV. (d): Superposición en un año de los flujos de REPT en 246 keV. Los datos de los cuatro paneles corresponden a RBSPb.

4.2. Variación Semianual en la Fluencia de electrones relativistas en órbita geosíncrona

Esta Figura demuestra que entre los tres elementos involucrados en los procesos de aceleración local de electrones a energías relativistas, el único que posee una Variación Semianual reconocible son las ondas coro.

4.2. Variación Semianual en la Fluencia de electrones relativistas en órbita geosíncrona

Los resultados de las secciones anteriores revelan la presencia de la Variación Semianual en el Cinturón de Radiación exterior utilizando datos de RBSP, que han sido validados con los datos de SAMPEX. En esta sección se busca consolidar estos resultados con la serie temporal de Fluencia de electrones relativistas proveniente de los satélites GOES. El análisis es mas limitado en energía y distribución radial comparado con las secciones previas porque sólo se consideran datos de Fluencias >2 MeV en órbita geosíncrona. Sin embargo, el análisis es mucho mas consistente en tiempo, ya que se procesa una serie temporal de dos ciclos solares de observaciones, duplicando aproximadamente la cantidad de observaciones de SAMPEX. El otro objetivo principal de esta sección, como se menciona en la introducción de este capítulo, es analizar la Variación Semianual en ondas Pc5 derivadas de observaciones geomagnéticas.

4.2.1. Observaciones utilizadas

En esta Sección se utilizaron datos de GOES, específicamente valores de Fluencia de electrones relativistas con energías >2 MeV. Los datos consisten valores diarios que abarcan los Ciclos Solares 22 y 23 completos, desde junio de 1987 hasta diciembre de 2009 incluido. En la Sección 3.2.2 se describen las generalidades de esta misión, así como las especificaciones al armar la serie de datos procesada en esta sección. Para mas detalles revisar dicha sección.

Por otro lado, para estudiar ondas de muy baja frecuencia, en el rango de frecuencias Pc5 (Jacobs et al., 1964), se calcularon espectros de amplitud de datos de la componente geomagnética X en estas frecuencias, utilizando datos recolectados por los observatorios de la red CANMOS. Los datos cubren el mismo período que los datos de Fluencia de electrones. La Sección 3.1 ofrece una explicación detallada de la secuencia temporal utilizada. En lo que sigue se refiere simplemente como Pc5 a los espectros de amplitud calculados de las ondas en las frecuencias Pc5 .

4.2.2. Características generales de las amplitudes en Pc5 y la Fluencia de electrones en los ciclos solares 22 y 23

La Figura 4.13 representa las secuencias completas de valores diarios de Pc5 en el panel superior y Fluencia en el panel inferior, ambas como puntos negros. La línea negra sólida representa el promedio móvil de ambas secuencias, calculado con una ventana centrada de 365 días de longitud. Se agregó también la secuencia de manchas solares suavizadas (curva naranja) para representar el ciclo solar.

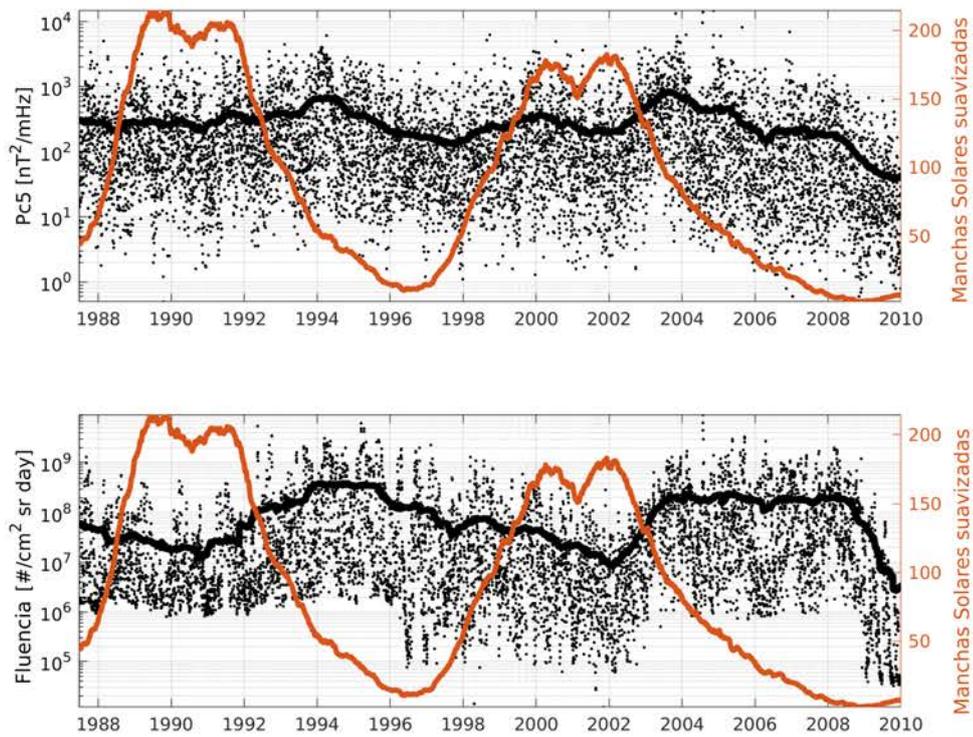


Figura 4.13. Panel superior: Valores diarios de amplitud de Pc5 (puntos negros). La línea negra sólida representa el promedio móvil con una ventana centrada de 365 días de longitud. Panel inferior: Análogo al panel superior pero para los valores diarios de Fluencia. La línea naranja representa la progresión del ciclo solar de manchas (curva suavizada).

4.2. Variación Semianual en la Fluencia de electrones relativistas en órbita geosíncrona

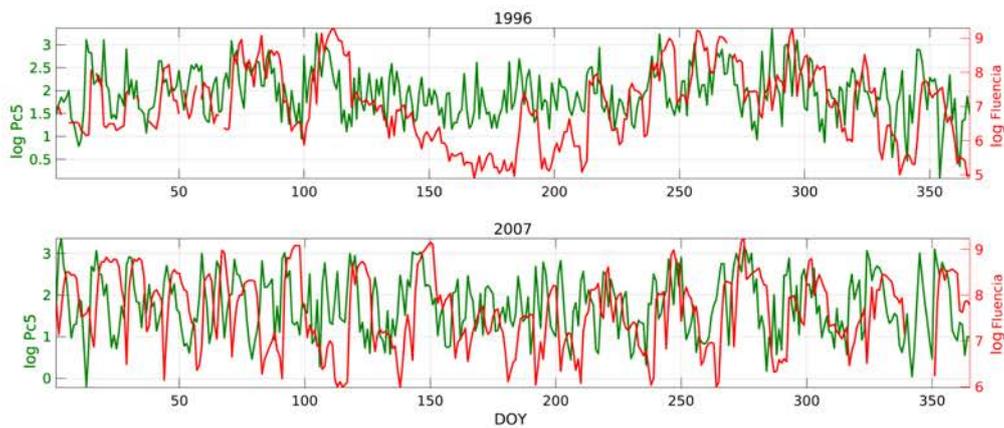


Figura 4.14. Fluencia (curva roja) y amplitudes en Pc5 (curva verde) para los años 1996 (panel superior) y 2007 (panel inferior).

Las curvas suavizadas de Pc5 y Fluencia sirven para destacar las tendencias a largo plazo. Por ejemplo, se observan valores altos en las fases descendentes de ambos ciclos. Las características a largo plazo se siguen a grosso modo, con diferencias menores en las tendencias de ambas cantidades en fases particulares (por ejemplo que Pc5 aumenta mientras la Fluencia disminuye en la primera parte del ciclo solar 23).

Para ver la relación entre Pc5 y Fluencia en una escala anual, la Figura 4.14 muestra ambas cantidades para 1996 y 2007 que pertenecen a la fase descendente del Ciclo Solar 22 y 23 respectivamente. El eje x corresponde al día del año (DOY). Los picos y valles de ambas cantidades se siguen con un retraso de unos días de los picos en Fluencia con respecto a los picos en Pc5. Este retraso es mas claro para el año 2007 que para 1996 y fue estudiado en detalle por Lam (2017), quién concluyó que Pc5 puede utilizarse para predecir Fluencias en órbitas geosíncronas y también que este retraso es menor cuanto mayor sea la intensidad de Fluencia. La Figura 4.14 muestra también que en 1996 la Fluencia sigue un claro patrón semianual, que es difícilmente reconocible cuando se miran años particulares. Esta Variación Semianual será investigada mas a fondo en las siguientes secciones.

4.2.3. Variación Semianual y comparación con teorías clásicas

Para investigar la Variación Semianual en Pc5 y en la Fluencia de electrones energéticos, se aplicó un análisis de superposición al logaritmo de ambas secuencias completas. Se calculó la mediana para todos los DOY entre 1 y 365 (el valor extra de años bisiestos no fue utilizado). Se tienen ~ 23 valores por DOY para calcular la mediana (por los 23 años de datos diarios). Los resultados pueden observarse en la Figura 4.15 dónde se muestra la curva superpuesta con líneas negras en el panel izquierdo y derecho que corresponde a Pc5 y Fluencia respectivamente. Utilizamos la mediana y no la media como valor de tendencia central en la superposición ya que suele ser menos influenciada por la presencia de valores extremos dando una mejor estimación del “valor típico”. Teniendo en cuenta que se tienen

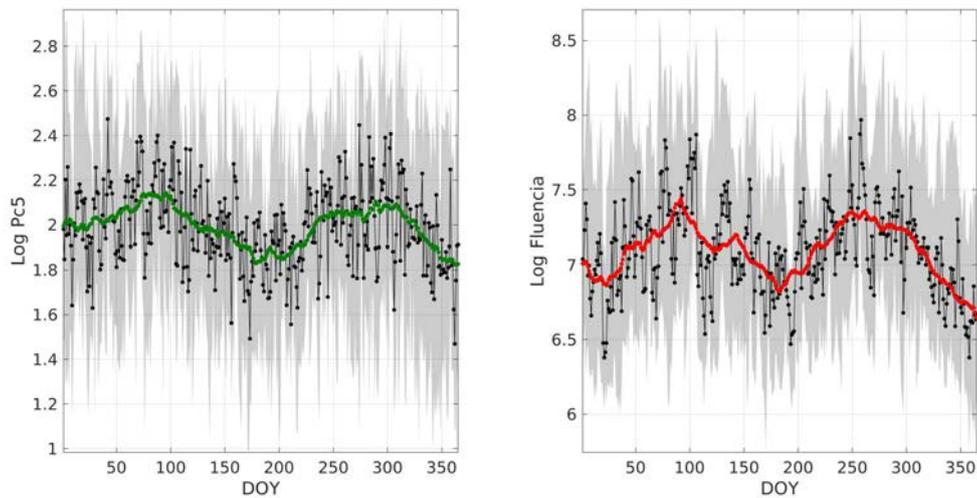


Figura 4.15. Superposición anual del logaritmo de Pc5 (panel izquierdo) y Fluencia (panel derecho). La mediana es representada como una curva negra y los cuartiles como el límite superior e inferior de la región gris. La curva verde y roja corresponden a la curva negra suavizada para Pc5 y Fluencia respectivamente ($Pc5_{SAV}$ and Fl_{SAV}).

23 años de observaciones para ambas cantidades y que estas cantidades varían en órdenes de magnitud, la mediana permite pesar de manera distinta los valores fuera de rango. El límite superior e inferior de la región gris marca los cuartiles.

En la Figura 4.15 se muestran también las curvas con las medianas suavizadas con un promedio móvil utilizando una ventana centrada de 30 días. La curva verde corresponde a Pc5 y la curva roja a la Fluencia y serán referidas como $Pc5_{SAV}$ y Fl_{SAV} respectivamente.

$Pc5_{SAV}$ y Fl_{SAV} demuestran una clara Variación Semianual con máximos cerca de los equinoccios y mínimos cercanos a los solsticios. La Variación Semianual puede verse también en la curva mediana y los cuartiles aunque no tal claramente. La variación pico a pico de Fl_{SAV} es de aproximadamente un orden de magnitud y de ~ 0.5 órdenes de magnitud para $Pc5_{SAV}$.

Patrones anuales

La Figura 4.16 muestra los patrones semianuales de los ángulos de las tres teorías principales junto con Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$, estas últimas secuenciadas a intervalos de tres días. Fl_{SAV} sigue mejor el patrón semianual entre los DOYs 180 y 365 aproximadamente. De hecho entre los DOYS 200 y 250, $Pc5_{SAV}$ casi superpone a la curva del patrón semianual de ϕ . Entre los DOYs 1 y ~ 60 , Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$ alcanzan valores mas grandes que las curvas de los ángulos.

La Tabla 4.2 muestra el resultado de calcular el coeficiente de correlación entre Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$ y los patrones semianuales de los tres ángulos. La Variación Semianual en la

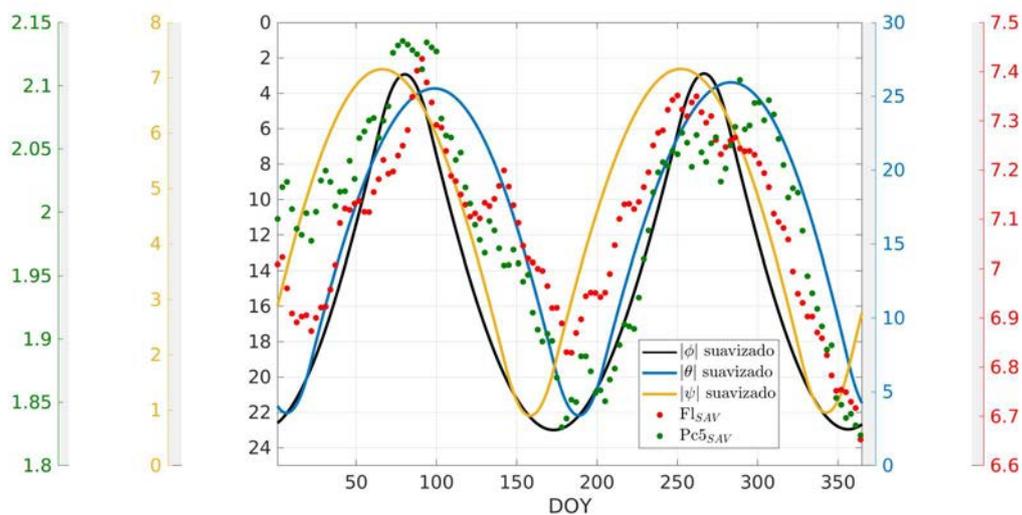


Figura 4.16. Valores absolutos suavizados (perfiles semianuales) de los ángulos asociados con la Teoría Equinoccial, de RM y Axial respectivamente. También se muestran las curvas Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$ a intervalos de tres días.

Ángulos suavizados			
	$ \phi $	$ \theta $	$ \psi $
Fl_{SAV}	-0.87	0.82	0.69
$Pc5_{SAV}$	-0.81	0.8	0.64

Tabla 4.2. Coeficiente de correlación entre los perfiles semianuales de los ángulos (ϕ , θ y ψ) y $Pc5_{SAV}/Fl_{SAV}$.

Fluencia parece estar dominada por la teoría Equinoccial ya que la correlación entre el patrón semianual de ϕ y Fl_{SAV} alcanza un mínimo de -0.87 , lo que significa que la anti-correlación es muy buena. La correlación con la hipótesis RM es levemente menor ($r = 0.82$). Por el contrario, ambas hipótesis (RM y equinoccial) presentan valores comparables de correlación (o anti-correlación) con $Pc5_{SAV}$, lo que sugiere que ambos mecanismos podrían jugar roles igualmente importante en la generación de la Variación Semianual en las ondas Pc5. El patrón semianual del ángulo correspondiente a la hipótesis axial presenta el menor valor de correlación en ambos casos (0.69 para Fl_{SAV} y 0.64 para $Pc5_{SAV}$).

Correlaciones con dependencias funcionales de los ángulos

En principio, la comparación utilizando los patrones semianuales de los ángulos debería permitir estimar el mecanismo dominante. Sin embargo, sería esperable una mejor aproximación comparando con dependencias funcionales de los ángulos. Para esto, se utilizaron funciones de ϕ y θ propuestas por diferentes autores en el estudio de la Variación Semianual en la actividad magnética.

	$S(\phi)$	$Ak(\theta)$
Fl_{SAV}	0.88	0.80
$Pc5_{SAV}$	0.83	0.79

Tabla 4.3. Coeficientes de correlación de las dependencias funcionales de los ángulos $S(\phi)/Ak(\theta)$ con $Pc5_{SAV}/Fl_{SAV}$.

Svalgaard (1977) demostró que el índice am puede ser ajustado empíricamente usando una expresión para el Campo Magnético Dipolar, parametrizado en términos del ángulo que controla la teoría equinoccial. La parte angular de la función propuesta por este autor expresadas en términos del ángulo ϕ utilizado aquí es $S(\phi) = (1 + 3 \cos^2(90^\circ - \phi))^{-2/3}$.

Por otro lado, el ángulo θ de la hipótesis RM es considerado en el “parámetro de Akasofu” (Perreault & Akasofu, 1978) que es muy utilizado para caracterizar la energía del Viento Solar que ingresa a la magnetosfera. La parte angular de este proxy tiene la forma $Ak(\theta) = \sin^4(\theta/2)$. Finch & Lockwood (2007) determinaron que las funciones con esta dependencia angular son muy exitosas en cuantificar las perturbaciones magnéticas en escalas temporales $\gtrsim 1$ día.

Correlacionando $S(\phi)$ y $Ak(\theta)$ con Fl_{SAV} y $Pc5_{SAV}$ se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.3. Los valores de correlación de $S(\phi)$ son ligeramente mejores que si se utiliza el perfil semianual de $|\phi|$ y lo contrario ocurre con $Ak(\theta)$ (comparar con valores de Tabla 4.2). Sin embargo, todos los valores son muy similares a los obtenidos en la Sección 4.2.3 por lo que no se pueden sacar conclusiones adicionales.

Fechas de máximos y mínimos

Continuando la comparación con las teorías clásicas, se determinaron las fechas de los máximos y mínimos de la Variación Semianual en la Fluencia y en Pc5 y se las comparó con las fechas de máximos y mínimos de las tres hipótesis. Los resultados se muestran a continuación.

Primero, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados no lineal a las curvas medianas (curvas negras) de la Figura 4.15 con la siguiente función:

$$f(t) = A^0 + A^a \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + \alpha^a\right) + A^{sa} \sin\left(\frac{4\pi}{365}t + \alpha^{sa}\right), \quad (4.3)$$

que contiene periodicidades anual y semianual fijas y cinco parámetros a ajustar. Estos son: A^0 , A^a , α^a , A^{sa} and α^{sa} . La Figura 4.17 muestra a $f(t)$ como una curva verde(roja) en el panel izquierdo(derecho), que corresponde al ajuste de Pc5(Fluencia). Las otras curvas de esta figura son la mediana y los cuartiles, del mismo modo en el que fue presentado en la Figura 4.15.

Ambos ajustes siguen el patrón semianual de las curvas medianas. Los coeficientes que controlan la amplitud de los términos semianuales son: $A^{sa} = -0.23$ y $A^a = -0.12$ para la

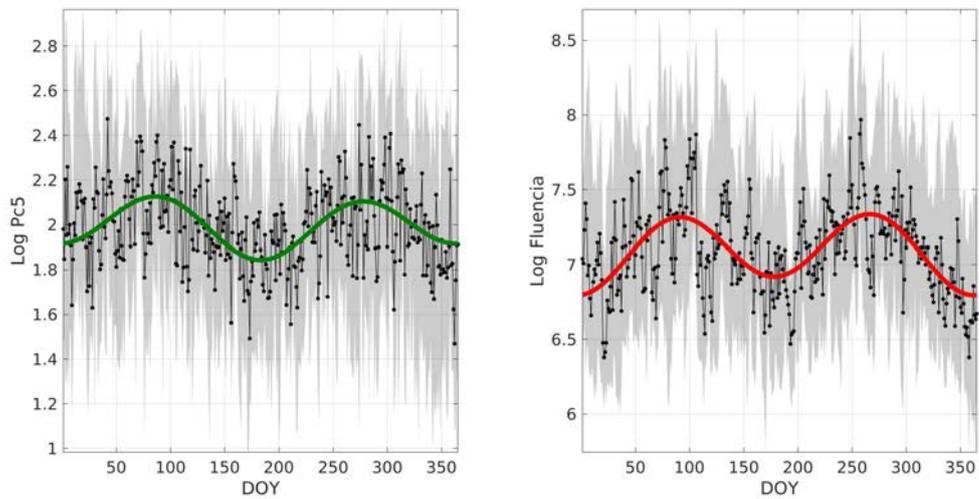


Figura 4.17. Superposición anual del logaritmo de las amplitudes en Pc5 (panel izquierdo) y Fluencia (panel derecho). La mediana y los cuartiles son representados como una curva negra, el límite superior e inferior en la figura respectivamente. La curva verde y roja son los ajustes de la mediana usando $f(t)$ de la Ecuación 4.3. Los parámetros del ajuste de la Fluencia son $(A^0, A^a, \alpha^a, A^{sa}, \alpha^{sa}) = (7.09, -0.06, 1.48, -0.23, 1.72)$ y los del ajuste de la amplitud en Pc5 $(A^0, A^a, \alpha^a, A^{sa}, \alpha^{sa}) = (2, 0.04, 1.28, -0.12, 1.61)$.

Fluencia y Pc5 respectivamente. Por otro lado, los coeficientes para el ajuste de los términos anuales son menores, siendo $A^a = -0.06$ para la Fluencia y $A^a = 0.04$ para Pc5.

Una característica interesante que revela $f(t)$ es que el mínimo de junio/julio y el de diciembre/enero son asimétricos en ambos ajustes. El mínimo de $f(t)$ en junio/julio alcanza valores mas bajos que el mínimo de diciembre/enero para la curva de Pc5 y lo opuesto ocurre con el ajuste de las Fluencias. Por el contrario, esta asimetría no ocurre en el caso de los máximos de ambos ajustes.

Una vez determinados los coeficientes de $f(t)$, se buscaron los valores de t que obedecen $df(t)/dt = f'(t) = 0$, que son los tiempos de los máximos o mínimos de $f(t)$ (los valores extremos de la función). Para ello se utiliza el método conocido como “Newton-Raphson”, que es una metodología clásica para encontrar ceros de una función (Ypma, 1995). A los valores encontrados se los referirá como $t_{\max,\min}$ y caracterizan los valores máximos/mínimos de la Variación Semianual en la Fluencia y en Pc5.

Se tiene $f'(t) = \frac{2\pi}{365} \left(A^a \cos \left(\frac{2\pi}{365} t + \alpha^a \right) + 2A^{\text{sa}} \cos \left(\frac{4\pi}{365} t + \alpha^{\text{sa}} \right) \right)$; expandiendo $f'(t)$ alrededor de un valor arbitrario \tilde{t} (cerca de $t_{\max,\min}$) hasta el término lineal y haciendo $f'(\tilde{t}) \simeq 0$ se encuentra

$$t \simeq \tilde{t} + \frac{A^a \cos \left(\frac{2\pi}{365} \tilde{t} + \alpha^a \right) + 2A^{\text{sa}} \cos \left(\frac{4\pi}{365} \tilde{t} + \alpha^{\text{sa}} \right)}{\frac{2\pi}{365} \left(A^a \sin \left(\frac{2\pi}{365} \tilde{t} + \alpha^a \right) + 4A^{\text{sa}} \sin \left(\frac{4\pi}{365} \tilde{t} + \alpha^{\text{sa}} \right) \right)}. \quad (4.4)$$

Si se llama $t = t_{n+1}$ y $\tilde{t} = t_n$ y se itera la Ecuación 4.4 hasta que $|t_n - t_{n+1}|$ tome valores menores a una cantidad pequeña (una condición de corte para el proceso de iteración). En ese momento t_n se convierte en $t_{\max,\min}$.

Una vez determinado $t_{\max,\min}$, se puede interpretar en la Ecuación 4.4 a t en función de los parámetros (para valores cercanos a $t_{\max,\min}$), osea $t = F(A^0, A^a, \alpha^a, A^{\text{sa}}, \alpha^{\text{sa}})$. De este modo, se puede utilizar propagación de errores en la determinación de t en función F . El error en t será $\sigma_t = \sqrt{BC_f B^T}$, donde $B = \left(\frac{\partial F}{\partial A^0}, \frac{\partial F}{\partial A^a}, \frac{\partial F}{\partial \alpha^a}, \frac{\partial F}{\partial A^{\text{sa}}}, \frac{\partial F}{\partial \alpha^{\text{sa}}} \right)$ es la matriz con las derivadas de F evaluadas $t_{\max,\min}$ y C_f es la matriz de covarianzas del ajuste de mínimos cuadrados.

En la Tabla 4.4 se encuentran las fechas de los máximos y mínimos ($t_{\max,\min}$) con los intervalos de incerteza $2\sigma_t$. También se han agregado los valores de la Tabla 2.1, que muestra las fechas de máximos y mínimos predichas por los tres mecanismos clásicos. Por último, la Tabla 4.4 contiene también cuál de las predicciones de los tres mecanismos caen dentro del intervalo de incerteza.

Para la Variación Semianual en la Fluencia, la mejor predicción proviene de la Hipótesis Equinoccial ya que ambos mínimos caen en el intervalo de incerteza. Algo similar ocurre con el máximo de septiembre con tan sólo un día de diferencia entre el valor observado y el valor predicho por la Hipótesis Equinoccial. Sin embargo, los tres mecanismos fallan en predecir el máximo de marzo en la Fluencia que cae en el medio de las predicciones de la hipótesis Equinoccial y RM. Notar que si bien las tres teorías fallan en predecir este máximo, el escenario es distinto a lo que ocurre con los flujos de electrones relativistas en el corazón del cinturón de radiación externo estudiados en la Sección 4.1.2, pues los resultados indican que esta región el máximo aparece retrasado aproximadamente un mes de la mejor estimación.

4.2. Variación Semianual en la Fluencia de electrones relativistas en órbita geosíncrona

	máx. marzo/abril	mín. junio/julio	máx septiembre/octubre	mín. diciembre/enero
fechas teóricas				
Equinoccial	21 marzo	22 junio	23 septiembre	22 diciembre
Russell & McPherron	7 abril	7 julio	11 octubre	6 enero
Axial	7 marzo	7 junio	9 septiembre	8 diciembre
fechas observadas				
Ajuste en Fluencia	31 marzo (± 5.2)	26 junio (± 5.5)	22 septiembre (± 5.1)	27 diciembre (± 5.0)
Ajuste en Pc5	26 marzo (± 7.0)	1 julio (± 6.6)	4 octubre (± 7.4)	28 diciembre (± 7.7)
Correspondencia de las fechas observadas con las fechas predichas				
Ajuste en Fluencia	ninguna	Equinoccial	Equinoccial	Equinoccial
Ajuste en Pc5	Equinoccial	RM	RM	Equinoccial

Tabla 4.4. Fechas de máximos y mínimos para las curvas de $|\phi|$, $|\theta|$ y $|\psi|$ y también de los ajustes ($f(t)$).

Para la Variación Semianual en Pc5, no es posible encontrar un efecto dominante ya que la Teoría Equinoccial y de RM predicen un máximo y un mínimo cada una, pero no ambos.

Los resultados de esta sección coinciden con los encontrados en el análisis de los patrones de la Sección 4.2.3. La Hipótesis Equinoccial parece ser dominante en la generación de la Variación Semianual en la Fluencia. Por otro lado, ambos efectos, el Equinoccial y de RM son igualmente importantes en la generación de la Variación Semianual en Pc5.

Capítulo 5

Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

Los principales constituyentes de la Corriente Anillo son los flujos de las especies H^+ , O^+ y He^+ en el rango de energías que va de los keV a cientos de keV. Así lo indican múltiples investigaciones previas, desde trabajos pioneros como el de Frank (1967), hasta estudios mas recientes como (Zhao et al., 2015). En este capítulo se propone investigar si los flujos de estos elementos poseen una Variación Semianual reconocible en su dinámica.

Para los distintos análisis de este capítulo, se utilizaron datos de RBSPICE de la misión RBSP y se desarrolló un algoritmo que implementa la relación DPS (Sección 2.6). Esta relación permite estimar variaciones magnéticas en superficie a partir de la energía de los flujos de las especies. Dichas estimaciones son comparadas con el índice Dst a lo largo de todo el capítulo.

El Capítulo comienza con el análisis de H^+ que luego se extiende a las especies restantes.

5.1. Derivación de $J(E, L)$ - Serie diaria de flujos omnidireccionales

Debido a su configuración orbital, las sondas RBSPa y RBSPb escaneaban los Cinturones de Radiación en regiones ecuatoriales desde una distancia de 2 a 7 R_T aproximadamente (ver Sección 3.2.1), realizando casi tres vueltas en un día. En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo de los flujos omnidireccionales en función de L dipolar de H^+ para el día 20/10/2016 provenientes de ambas sondas, RBSPa (puntos negros) y RBSPb (cruces azules). Los tres paneles corresponden a tres niveles de energía distintos: ~ 67 keV (panel izquierdo), ~ 148 keV (panel central) y ~ 400 keV (panel derecho). En este capítulo se utiliza el L dipolar porque el cálculo de la energía contenida requiere esta cantidad y no el L de McIlwain, utilizado en el Capítulo .

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

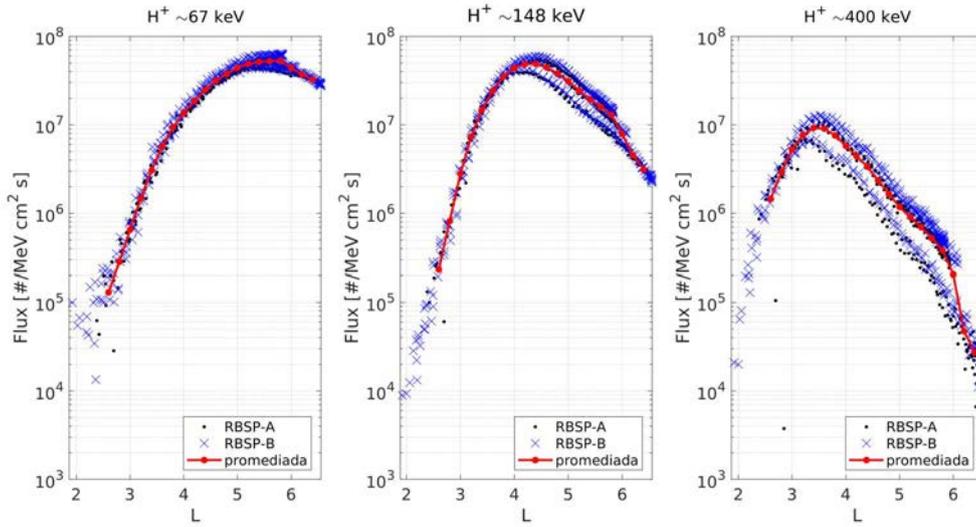


Figura 5.1. Mediciones de flujo omnidireccional en función de L dipolar para RBSPa (puntos negros) y RBSPb (cruces azules) en el día 20/10/2016. Los tres paneles corresponden a tres niveles de energía distintos: ~ 67 keV (panel izquierdo), ~ 148 keV (panel central) y ~ 400 keV (panel derecho). Las curvas rojas indican la curva promediada llamada $J(E, L)$ (ver texto).

Comparando los datos en los tres paneles, se pueden identificar dos características de esta población de partículas. La primera es que los niveles máximos de flujos alcanzados dependen de la energía, tomando valores mayores para energías mas bajas y viceversa ($\sim 6.5E7$, $\sim 6E7$ y $\sim 1.3E7$ respectivamente de izquierda a derecha en la Figura 5.1). La segunda es que el valor de L en el que el flujo alcanza el máximo decrece al aumentar el canal de energía (~ 5.5 , ~ 4.5 y ~ 3.5 respectivamente de izquierda a derecha en la Figura 5.1). Las curvas rojas son calculadas promediando los flujos de ambas sondas a intervalos regulares de L entre $L_{\min} = 2.5$ y $L_{\max} = 6.5$ con $\Delta L = 0.2$. Para esta fecha el índice Dst fue superior a -19 nT siendo un día de actividad baja. Consecuentemente, las desviaciones con respecto a la curva promediada son pequeñas. Sin embargo, esto puede cambia y el nivel de dispersión puede aumentar considerablemente para días perturbados.

Extendiendo el procedimiento de calcular una curva promedio diaria para todos los días entre 2013 y 2018 y todos los canales de energía, se obtienen curvas que contienen las variaciones de los flujos en energía y en L para todo el período de medición utilizado. A esta curva promediada se la denominará $J(E, L)$.

La Figura 5.2 muestra los valores del logaritmo de $J(E, L)$ en un diagrama de intensidades para los tres canales mostrados en la Figura 5.1, para todos los días entre 2013 y 2018. Se puede observar que las dos características identificadas en la Figura 5.1 (variación de la intensidad del pico según canales de energía y ubicación en L del mismo) se repiten a lo largo de todo el período de datos.

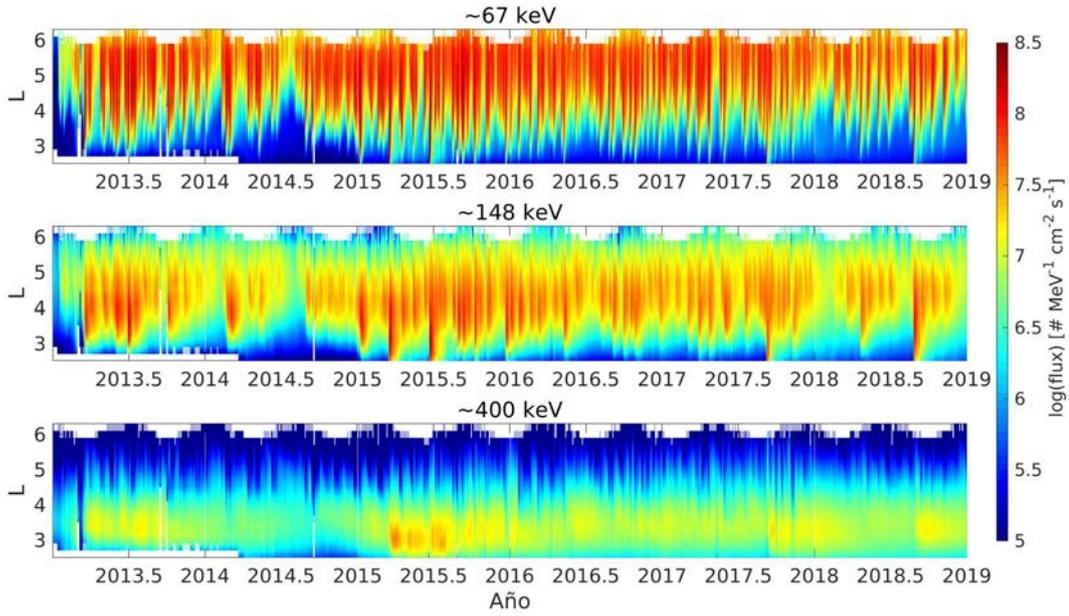


Figura 5.2. Distribución en L de $J(E, L)$ para los tres canales de energía de la Figura 5.1 a lo largo de todo el período de medición utilizado.

5.2. Energía contenida (Ec^{H^+})

En la Sección 2.5 se demostró que la densidad de energía de un conjunto de partículas (ε) puede ser estimada utilizando flujos omnidireccionales con la Ecuación 2.9. Si se integra ε en un volumen V , se obtiene la Energía total contenida en dicho volumen que se referirá como Ec^{H^+} . Esto es:

$$Ec^{H^+} = \int_V \varepsilon dV = \int_V \int_0^\infty 2\pi\sqrt{2mE}j(E, L)dEdV, \quad (5.1)$$

en dónde hemos hecho explícita la dependencia espacial de los flujos omnidireccionales considerando el parámetro L .

Para calcular Ec^{H^+} , se aproximan ambas integrales. Intercambiando el orden de integración, se tiene:

$$Ec^{H^+} = \sum_{E=E_{\min}}^{E_{\max}} \left(\sum_{L=L_{\min}}^{L_{\max}} 2\pi\sqrt{2mE_i} j(E_i, L_j)\Delta V(L_j) \right) \Delta E_i = \sum_{E=E_{\min}}^{E_{\max}} \Delta Ec_i^{H^+}, \quad (5.2)$$

en dónde $\Delta Ec_i^{H^+}$ representa la contribución de cada nivel de energía integrada en el volumen. Se llama $j(E, L) = J(E, L)$, dónde $J(E, L)$ es la serie diaria de flujos omnidireccionales definida en la Sección 5.1. El volumen de integración utilizado es el volumen entre la superficie

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

terrestre y la superficie dipolar a un L determinado¹, cuya expresión analítica es:

$$V(L) = V_T \left[L^3 \left(1 - \frac{1}{L} \right)^{1/2} \left(\frac{0.43}{L^3} + \frac{0.171}{L^2} + \frac{0.229}{L} + 0.457 \right) - \left(1 - \frac{1}{L} \right)^{1/2} \right], \quad (5.3)$$

donde $V_T = 1.083 \cdot 10^{21} \text{ m}^3$ es el volumen de la Tierra. Esta expresión ha sido aplicada en diversos trabajos, por ejemplo (Turner et al., 2001; Zhao et al., 2015).

Se tomaron los valores $L_{\min} = 2.5$ y $L_{\max} = 6.5$ con un paso de $\Delta L = 0.2$ (al igual que para la determinación de $J(E, L)$) para calcular los $\Delta V(L_j)$ con la Ecuación 5.3, de la forma $\Delta V(L_j) = V(L_j + 0.1) - V(L_j - 0.1)$. Para las energías, E_i corresponden a los valores de los distintos canales de energía para las distintas especies, tratadas en la Sección 3.2.1. En este caso, para H^+ es $E_{\min} = 44.7 \text{ keV}$ y $E_{\max} = 488.9 \text{ keV}$.

La Figura 5.3 muestra las curvas de $\Delta E c^{H^+}$ correspondientes a los tres niveles de energía mostrados en las Figuras 5.1 y 5.2: $E \sim 67 \text{ keV}$ (curva azul), $E \sim 148 \text{ keV}$ (curva roja) y $E \sim 400 \text{ keV}$ (curva verde) para toda la serie (panel superior) y para un año en particular (2016 en panel inferior). La curva negra es la suma de las contribuciones $\Delta E c^{H^+}$ de todos los canales, es decir $E c^{H^+}$. Las contribuciones de los tres canales están en órdenes de magnitud similares lo que demuestra que todos los niveles de energía contribuyen a $E c^{H^+}$ y no hay un nivel de energía preferencial. Sin embargo, se diferencian notablemente en su variación temporal, siendo la dispersión de la contribución correspondiente al canal bajo notablemente mayor que la dispersión de la contribución del canal mas alto. Se puede ver también que las variaciones de las contribuciones de canales bajos y altos parecen estar anticorrelacionadas. Mientras una curva sube, la otra baja. Esto es evidente por ejemplo en los primeros meses del año 2016.

¹La “superficie dipolar” se define como la que mantiene constante al tercer invariante adiabático de la Ecuación 2.12. La Ecuación 5.3 es válida para el caso dipolar estático.

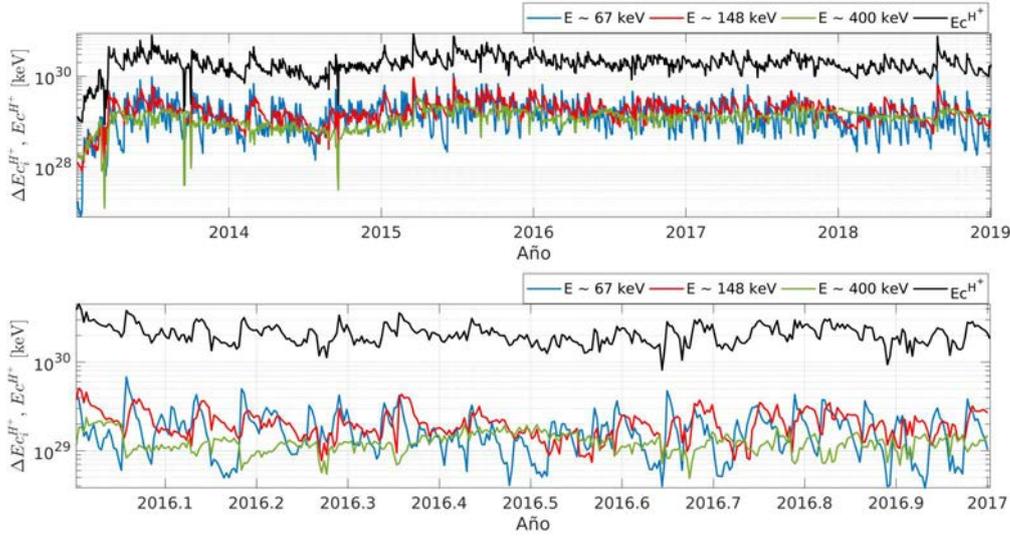


Figura 5.3. Panel superior: ΔEc^{H^+} para tres niveles de energía: $E \sim 67$ keV (curva azul), $E \sim 148$ keV (curva roja) y $E \sim 400$ keV (curva verde). La curva negra es la energía contenida total Ec^{H^+} . Panel inferior: Igual al panel superior pero sólo para el año 2016.

5.3. Variaciones magnéticas estimadas

La relación DPS permite calcular variaciones magnéticas a partir de la energía contenida en el flujo de H^+ (Ec) como:

$$\frac{\Delta B^{H^+}}{B^e} = -\frac{2}{3} \frac{Ec^{H^+}}{U_d},$$

donde ΔB^{H^+} es la variación magnética en el centro de la Tierra debido al flujo de H^+ en la magnetosfera, B^e es el valor en el Ecuador del campo dipolar evaluado en la superficie terrestre y U_d es la energía magnética del dipolo centrado evaluado en una esfera de radio igual al radio terrestre, que puede expresarse como $U_d = \frac{4}{3}\pi R_T^3 (B^e)^2$. Reemplazando esta última igualdad en la relación DPS se obtiene:

$$\Delta B^{H^+} = -\frac{\mu_0}{2\pi B^e R_T^3} Ec^{H^+} \quad (5.4)$$

La relación lineal entre ΔB^{H^+} y Ec^{H^+} permite estimar directamente las variaciones con solo escalar la energía contenida con un factor. La Figura 5.4 muestra en color azul los valores de ΔB^{H^+} para todo el período de medición procesado (panel superior) y para 2015 en particular (panel inferior), que resulta de utilizar los valores $B^e = 3.2 \cdot 10^{-5}$ T, $\mu_0 = 1.25663706 \cdot 10^{-6}$ m kg s⁻² A⁻² y $R_T = 6371$ km, que son valores estándar para estas cantidades. En ambos gráficos se ha agregado también la serie de los valores medios diarios del índice Dst (curva negra). Ambas curvas se siguen muy bien en ambos paneles. Para el año 2015 la concordancia es destacable. En ese año hubieron dos tormentas grandes en marzo y junio que ΔB^{H^+} parece

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

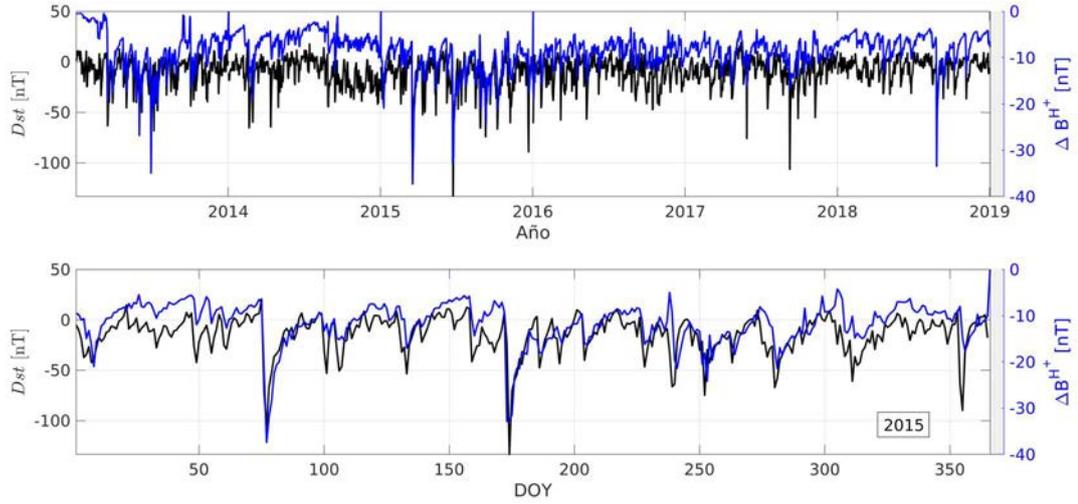


Figura 5.4. Panel superior: Perturbación magnética estimada ΔB^{H^+} (curva azul) para los flujos de H^+ durante todo el período de medición utilizado (2013-2018). Panel inferior: ΔB de H^+ sólo para 2015. En ambos paneles se ha agregado el índice Dst en los años correspondientes.

reproducir muy bien. Además, ΔB^{H^+} reproduce también las pequeñas variaciones o tormentas de menor intensidad. Con mayor o menor grado de error, esto parece repetirse en todo el período de medición. Por último, se puede observar que ΔB^{H^+} es aproximadamente una tercera parte del índice Dst . Un análisis más preciso de la relación entre las perturbaciones magnéticas estimadas y el índice Dst será desarrollado en la Sección 5.5.

5.4. Contribuciones de O^+ y He^+

Como se trató en la Sección 2.1.4, los flujos de las especies O^+ y He^+ aportan también a la corriente anillo. En esta sección se propone calcular las perturbaciones magnéticas estimadas de estas especies (ΔB^{O^+} y ΔB^{He^+}) con la relación DPS, para ver si alcanzan valores significativos y corroborar si la variación magnética completa dada por

$$\Delta B = \Delta B^{H^+} + \Delta B^{O^+} + \Delta B^{He^+} \quad (5.5)$$

mejoran la aproximación a las variaciones magnéticas medidas, representadas por ejemplo con el índice Dst . De este modo, se siguió el mismo procedimiento que el utilizado para estimar las variaciones magnéticas de H^+ en las Secciones 5.1-5.3.

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran en un diagrama de intensidades, la distribución en L de los flujos omnidireccionales promediados ($J(E, L)$) en tres canales de energía para O^+ y He^+ respectivamente. La primera diferencia de estas dos especies con respecto a H^+ está en los niveles de flujo alcanzados. Se puede ver que alcanzan picos en valores de $\sim 10^6 \text{ MeV}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que son dos órdenes de magnitud más bajos que los identificados para H^+ en la Figura

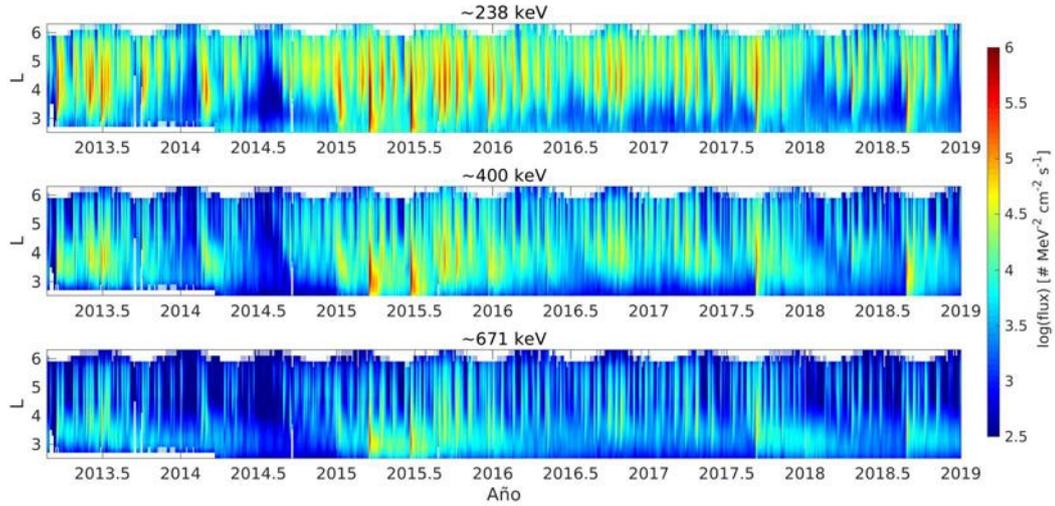


Figura 5.5. Distribución en L de $J(E, L)$ para la especie O⁺ en tres canales de energía: ~ 238 keV, ~ 400 keV y ~ 671 keV a lo largo de todo el período de medición utilizado.

5.2. Se puede observar que, como se detalla en la Sección 3.2.1, las tres especies se miden en canales de energía distintos, pero aproximadamente en los mismo rangos.

Para estas dos especies, y a diferencia de lo que ocurre con H⁺, no parece haber una variación evidente en L según el canal de energía. Si bien O⁺ presenta aumentos más esporádicos que H⁺ y He⁺, las tres especies presentan para los canales de energía más bajos, aumentos más frecuentes y alcanzando intensidades mayores que para los canales más altos.

Si se calcula la energía contenida por estas especies Ec^{O^+} y Ec^{He^+} , y luego las variaciones magnéticas de las mismas, es decir ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+} , se obtienen las curvas de la Figura 5.7, en donde la curva verde corresponde a ΔB^{He^+} y la roja a ΔB^{O^+} . Comparando con la Figura 5.4, se puede observar que ambas curvas alcanzan variaciones mucho más pequeñas que ΔB^{H^+} . Por ejemplo, para el mínimo de la tormenta de junio de 2015, $\Delta B^{He^+} \simeq -1.9$ nT y $\Delta B^{O^+} \simeq -0.8$ nT mientras que para H⁺ es $\Delta B^{H^+} \simeq -95$ nT. Calculando el valor medio de las tres curvas (ΔB^{H^+} , ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+}) se encuentra que $\Delta B^{O^+}/\Delta B \simeq 0.23\%$ y $\Delta B^{He^+}/\Delta B \simeq 1.54\%$. Por lo tanto, teniendo en cuenta la Ecuación 5.5, ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+} representan un aporte muy pequeño para ΔB comparado con el de ΔB^{H^+} . Una característica a destacar es que las curvas en la Figura 5.7 muestran que las variaciones magnéticas estimadas de O⁺ son menores que las de He⁺ para todo el período de datos.

Estos resultados indican que los flujos de O⁺ y He⁺ podrían considerarse despreciables en cuanto a su capacidad para generar variaciones magnéticas en superficie, lo que está de acuerdo con algunos trabajos previos, por ejemplo el de Zhao et al. (2015), en donde se encuentra que para una tormenta individual $\Delta B^{O^+}/\Delta B \simeq 1.09\%$. En este trabajo se encuentran estimaciones similares aún cuando se utilizan datos de otro sensor y se aplica un procedimiento distinto para calcular la energía contenida que en el artículo mencionado.

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

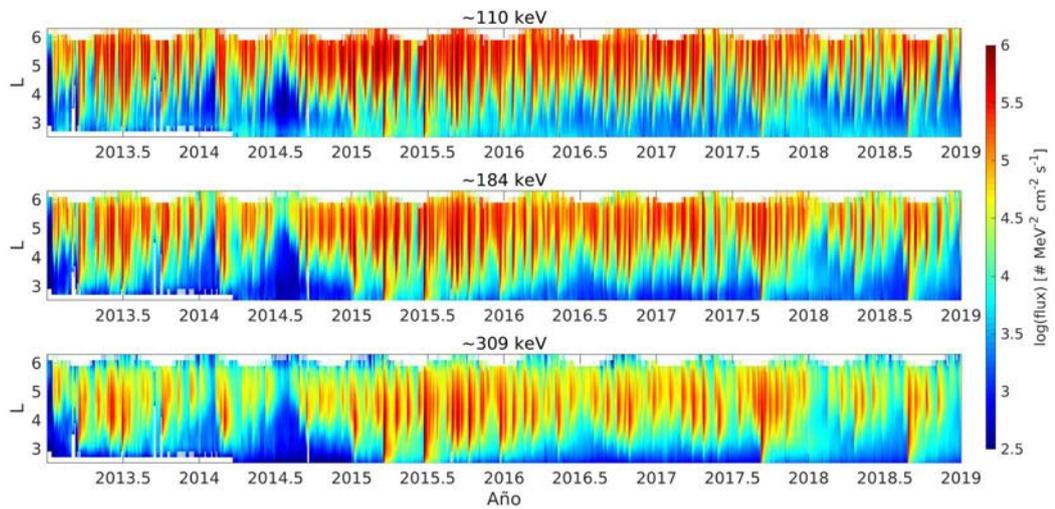


Figura 5.6. Distribución en L de $J(E, L)$ para la especie He^+ en tres canales de energía: ~ 110 keV, ~ 184 keV y ~ 309 keV a lo largo de todo el período de medición utilizado.

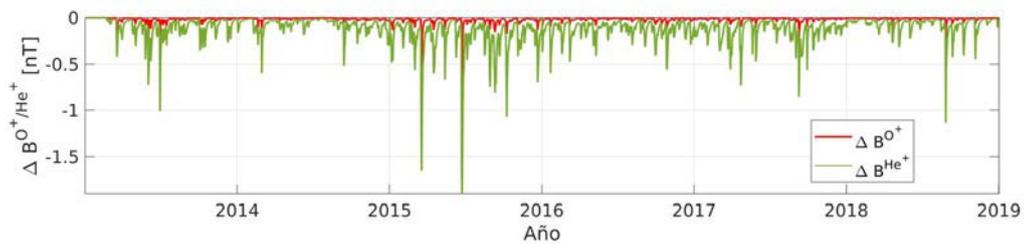


Figura 5.7. Variación magnética estimada ΔB^{He^+} para los flujos de He^+ (curva verde) y ΔB^{O^+} para los flujos de O^+ (curva roja) durante todo el período de medición utilizado (2013-2018).

5.5. Variabilidad de la energía contenida con los canales de energía y correlaciones con el índice *Dst*

Al correlacionar *Dst* con ΔB , ΔB^{H^+} , ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+} se obtienen los valores de la Tabla 5.1. Es interesante notar que, si bien ΔB^{He^+} no contribuye de manera significativa a ΔB , es el que mejor sigue las variaciones de *Dst*, ya que presenta la correlación mas alta. Sin embargo, los valores son altos para las tres especies de modo que todas siguen bastante bien las variaciones de este índice.

Como los valores de ΔB para cada especie provienen de *Ec* (Ecuación 5.4) y *Ec* proviene a su vez de la suma de todas las componentes $\Delta E c_i$, que representan la energía contenida del flujo de partículas en cada canal de energía *i*, si se correlaciona *Dst* con $\Delta E c_i$ se puede tener una idea de qué canal de energía sigue mejor las variaciones en el índice.

La Figura 5.8 presenta las curvas resultantes de correlacionar $|Dst|$ con $\Delta E c^{\text{H}^+}$ (curva negra), $\Delta E c^{\text{He}^+}$ (curva verde) y $\Delta E c^{\text{O}^+}$ (curva roja). Lo mas interesante de esta Figura es lo que ocurre con H^+ , pues la curva alcanza un máximo en los primeros canales de energía, ubicado entre el canal con $E \sim 54$ keV y con $E \sim 67$ keV, y luego desciende y toma valores negativos de correlación para los canales mas altos. Esto implica que sólo los flujos en un reducido rango de energía de H^+ serían los importantes para explicar las variaciones en *Dst* ya que los canales mas altos están decorrelacionados. El comportamiento que se menciona en la Sección 5.2 para las curvas azul y verde de la Figura 5.3 (correspondientes a $E \sim 67$ keV y $E \sim 400$ keV) se explica con estos resultados. Algunos autores han sugerido que la energía contenida por los flujos de H^+ en distintos canales contribuyen a generar la corriente anillo en tiempo de calma o de tormenta. Por ejemplo, en (Zhao et al., 2015) se sugiere que los iones de los canales de energía altos contribuyen a la corriente anillo en tiempos de calma y los de baja energía a la corriente anillo en los tiempos de tormenta.

Contrariamente a lo que ocurre con H^+ , para He^+ y O^+ los valores de correlación con $|Dst|$ se mantienen aproximadamente en los mismos niveles, siendo superiores a 0.5 para todo el rango de energía. Esto indica que la energía contenida de todos los canales siguen la variabilidad del índice de la misma manera.

Se puede establecer una comparación de la variabilidad de la energía contenida por los distintos canales desarrollado en esta sección, con la distribución en L de los flujos de las tres especies (tratada en las Secciones 5.1 y 5.4). En el caso de H^+ , la energía contenida de los canales que siguen la variabilidad del índice *Dst* son aquellos que se localizan en valores de L mas altos (máximos de flujo en ~ 5.5) y por el contrario los canales anticorrelacionados (con valores de correlación bajos) con el índice están distribuidos en valores menores de L

	ΔB	ΔB^{H^+}	ΔB^{He^+}	ΔB^{O^+}
<i>Dst</i>	0.60	0.59	0.71	0.62

Tabla 5.1. Coeficientes de correlación de *Dst* con ΔB , ΔB^{H^+} , ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+}

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

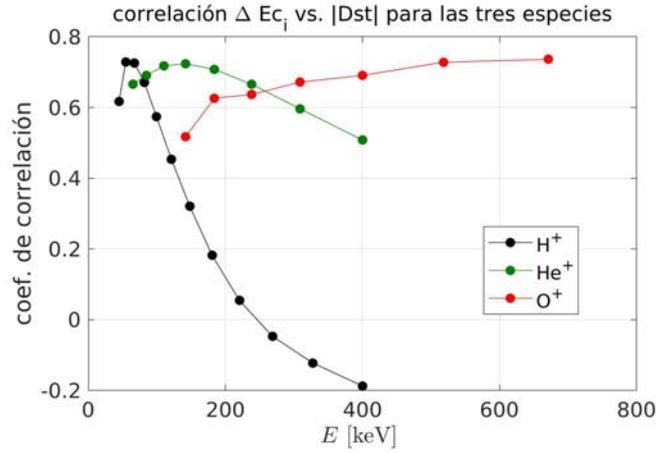


Figura 5.8. Coeficientes de correlación resultantes de correlacionar el módulo del índice Dst con la energía contenida por la Corriente Anillo (ΔEc) por las tres especies principales (H^+ , O^+ y He^+) para distintos canales de energía.

(máximos de flujo en ~ 3.5). Para las especies O^+ y He^+ , la variabilidad de Ec con los canales de energía al igual que la distribución en L de los flujos no muestra ningún patrón evidente.

Se debe mencionar aquí que si bien las correlaciones de Dst con las variaciones magnéticas estimadas presentan valores altos de correlación (Tabla 5.1), ambas cantidades no son en rigor directamente comparables. Para derivar Dst , se corrigen valores promediados de la componente H del CMT por variación secular y por variación diurna (Sq), este último representa los efectos de las corrientes de dínamo ionosféricas. Como las mediciones magnéticas en superficie son el resultado de la superposición de efectos de varias corrientes, Dst se encuentra “contaminado” por otras corrientes. Esto no ocurre con ΔB , ya que proviene directamente de los flujos de las especies. Se pueden mencionar algunos trabajos en los cuales se calculan estimaciones de los efectos sobre Dst de los sistemas de corriente mencionados. Por ejemplo, Langel & Estes (1985) estimaron que las corrientes inducidas en la corteza podrían incrementar el valor del índice entre un 24 % y un 29 %, dependiendo de la hora local magnética. A su vez, Turner et al. (2001) utilizaron versiones modificadas del modelo de Tsyganenko 89’ (Tsyganenko, 2005) y encontraron que el efecto de esta corriente puede significar hasta un 25 % del índice en la fase principal de tormenta. Por último, Burton et al. (1975) propusieron que los efectos de las corrientes de la magnetopausa podrían eliminarse considerando la presión del Viento Solar de la forma $Dst^* = Dst - b\sqrt{P} + c$, donde Dst^* es el “ Dst modificado”, P es la presión dinámica del viento, b y c son constantes.

5.6. Variación Semianual

Para visualizar la Variación Semianual en ΔB se aplica el procedimiento de superposición en un año patrón ya utilizado en otras secciones de este documento. En la Figura 5.9 se muestran las curvas suavizadas que resultan de la superposición de los valores diarios de ΔB

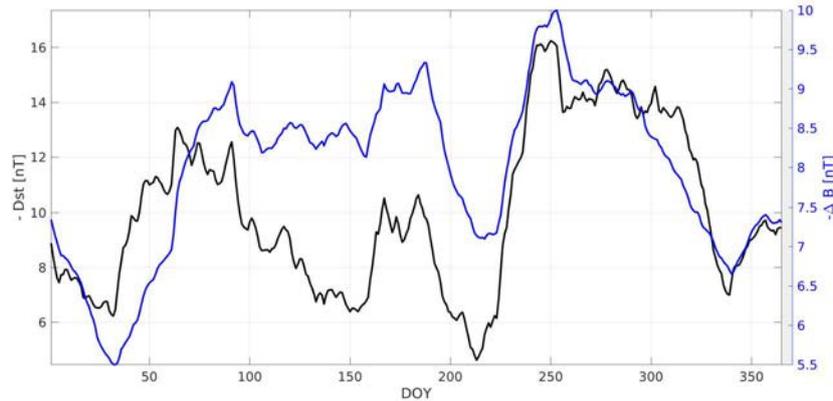


Figura 5.9. Superposición en un año patrón de la serie de valores diarios de $-\Delta B$ (curva azul) y de $-Dst$ en el período 2013-2018. Las curvas fueron suavizadas con un promedio móvil centrado de 30 días de longitud.

(curva azul) y Dst (curva negra) en los años de la misión RBSP utilizados (2013-2018).

La curva de ΔB no muestra un claro patrón semianual como en otras cantidades analizadas anteriormente. Si bien el máximo cercano al equinoccio de septiembre es evidente, al igual que el mínimo cercano al solsticio de diciembre, el restante máximo y mínimo no son claros. Al analizar detenidamente las mediciones, se puede comprobar que en la primer parte de 2013, hasta el DOY 67, RBSPICE midió valores por debajo de los valores promedio de la serie. Esto es evidente en los flujos de la Figura 5.2 y también se ve reflejado al calcular la energía contenida (ver por ejemplos primeros DOYs en el panel superior de la Figura 5.3). Al realizar la superposición, estos datos afectan la curva resultante.

Si no se tiene en cuenta el año 2013 en la superposición, tanto para la superposición de ΔB como de Dst se obtienen las curvas de la Figura 5.10. Ambas curvas son más similares entre sí que las de la Figura 5.9 y además el patrón semianual se hace evidente.

5.6.1. Correlación con las hipótesis clásicas

Para comparar con las tres teorías clásicas, se correlacionaron las curvas de los perfiles semianuales de las teorías clásicas con las curvas de la Figura 5.10. La Figura 5.11 muestra los perfiles semianuales de los tres ángulos junto con las curvas de la Figura 5.10 y los resultados de las correlaciones están presentes en la Tabla 5.2.

Los valores de correlación son similares para ambas cantidades ($-\Delta B$ y $-Dst$ superpuestos y suavizados). La teoría Equinoccial muestra el nivel de anticorrelación más alto en ambos casos, lo que implica un mejor acuerdo del perfil semianual de esta hipótesis con los perfiles observados. Le siguen la hipótesis de RM y por último la teoría Axial que muestra los menores valores de correlación, como en todas las variables semianuales analizadas en este trabajo.

5. Variación Semianual en las principales componentes de la Corriente Anillo terrestre

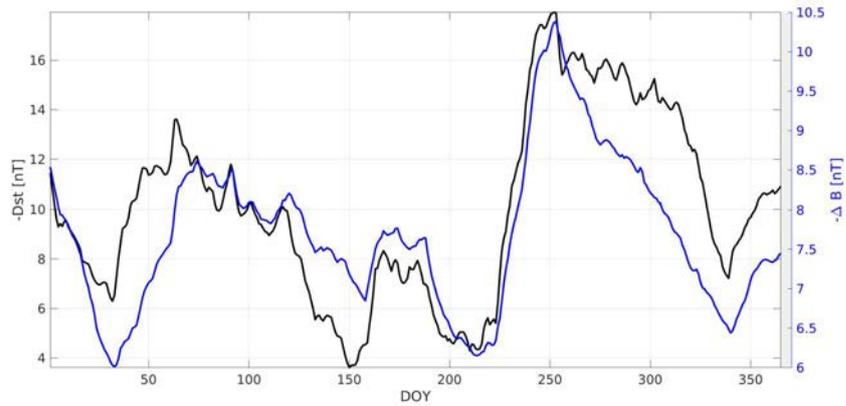


Figura 5.10. Superposición en un año patrón de la serie de valores diarios de $-\Delta B$ (curva azul) y de $-Dst$ en el período 2014-2018. Las curvas fueron suavizadas con un promedio móvil centrado de 30 días de longitud.

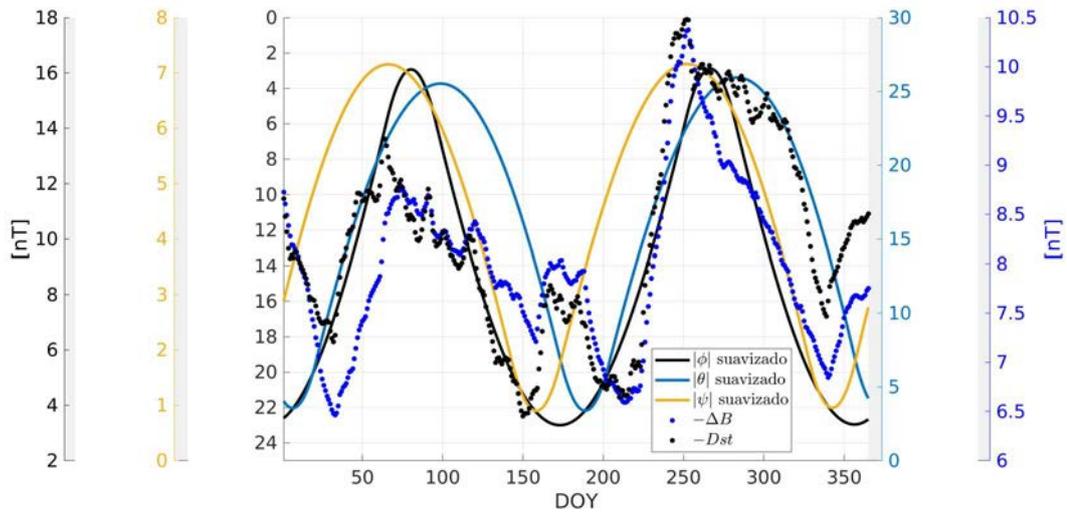


Figura 5.11. Valores absolutos suavizados (perfiles semianuales) de los ángulos asociados a la teoría Equinoccial, de RM y Axial respectivamente. También se muestran las curvas superpuestas y suavizadas de $-\Delta B$ y $-Dst$ en el período de medición de RBSP (2013-2018).

	Equinoccial (ϕ)	Russell & McPherron (θ)	Axial (ψ)
$-Dst$ superpuesto	-0.69	0.60	0.52
$-\Delta B$ superpuesto	-0.69	0.58	0.42

Tabla 5.2. Coeficientes de correlación entre los perfiles semianuales de los tres ángulos de las teorías clásicas con la serie de $-\Delta B$ y $-Dst$ superpuestos (y suavizados) en el período 2014-2018.

Capítulo 6

Conclusiones

Se puede mencionar como resultado principal, en el que se engloban todos los demás, al siguiente: la Variación Semianual está presente tanto en los flujos de electrones relativistas (y también en electrones en otros niveles de energía) proveniente de los datos de RBSP, como en los constituyentes de la Corriente Anillo. Vale la pena resaltar el aporte novedoso que significa haber estudiado esta variación con mediciones in-situ de las especies que componen la Corriente Anillo, ya que se invirtió la metodología clásica de estudiarla por medio de proxies, como por ejemplo el índice *Dst*.

A continuación se enumeran y resumen todos los resultados específicos obtenidos en este trabajo de tesis.

Electrones relativistas

En el primer grupo, el análisis de los datos de RBSP han arrojado los siguientes resultados novedosos:

1. **Los electrones relativistas del Cinturón de Radiación exterior presentan una clara Variación Semianual.**

Los datos de RBSP permiten derivar mapas de intensidad de flujo de electrones con un claro patrón semianual, que está de acuerdo con investigaciones previas utilizando datos de SAMPEX.

2. **La Variación Semianual está acotada al rango de energías $\sim 1-7$ MeV.**

Esto se revela en el análisis de superposición realizado a los datos de REPT y MagEIS en distintos canales de energía, cubriendo el rango: 0.1-6.3 MeV. A medida que las energías bajan en este rango, los flujos se vuelven mas estables y alcanzan valores mas altos.

3. **La Variación Semianual posee una distribución asimétrica en los máximos respecto de las predicciones de las teorías.**

El análisis de los mapas de intensidad mostrando como se distribuye la Variación Semianual en L y en el DOY revela que el primer máximo aparece retrasado, puesto que

los valores mas altos en el flujo de electrones ocurren alrededor de un mes después de la mejor predicción (la de RM). Este retraso se mantiene cuando eventos importantes son excluidos del set de datos, por ejemplo la tormenta de Marzo de 2015 y Septiembre de 2017. En el caso de los datos de SAMPEX, el retraso en el primer máximo es también evidente, y es un tema que vale la pena investigar ya que, como se señala en (Kanekal et al., 2010), aún no se conoce la causa.

4. La hipótesis RM es la que presenta el mejor acuerdo con la Variación Semianual observada en los datos de RBSP.

Así lo revelan las correlaciones de la Variación Semianual observada en cuatro canales de energía de REPT con el patrón semianual de las tres hipótesis principales. Los valores mas altos de correlación están dados para la hipótesis RM para valores de L en prácticamente todo el Cinturón de Radiación Exterior.

La aparición retrasada del primer máximo, mencionado en el punto anterior, hace que la correlación con los patrones no sea mas elevada.

5. Las ondas coro son el único elemento que presenta una Variación Semianual reconocible entre los tres elementos involucrados en la generación de electrones relativistas, en el marco de los procesos de aceleración local.

El análisis de superposición realizado a las poblaciones de electrones fuente y semilla no presenta una Variación Semianual, que se debe en parte a la dinámica de los electrones en estas energías, ya que suelen ser mas estables en el tiempo. Por el contrario, al identificar los máximos del espectro de potencia de las ondas coro se revela una clara variación de ~ 2 años de periodicidad, asociada a la órbita de las sondas ya que estas ondas suelen encontrarse típicamente en el sector del amanecer. Al sustraer esta periodicidad y realizar el proceso de superposición la Variación Semianual se hace presente.

6. Los electrones relativistas en órbita geosíncrona medidos por GOES presentan Variación Semianual.

Utilizando una serie temporal de dos Ciclos Solares de observaciones (22 y 23) y el proceso de superposición en un año, la Fluencia de electrones en energías >2 MeV revela un claro patrón semianual con valores aproximadamente un orden de magnitud mayores cerca de los Equinoccios que cerca de los Solsticios.

Las consecuencias sobre el Clima Espacial de este resultado son evidentes, ya que hay una mayor probabilidad de sufrir eventos de carga interna en los satélites (y por lo tanto anomalías operacionales) cerca de los equinoccios.

7. La ondas Pc5 derivadas con datos geomagnéticos de observatorios aurales presenta una Variación Semianual.

El análisis de los electrones relativistas en órbita geosíncrona se realizó conjuntamente con ondas Pc5 derivadas de observaciones geomagnéticas de los observatorios de la red

CANMOS. Estas ondas muestran un claro patrón semianual con diferencias de ~ 0.5 órdenes de magnitud entre Equinoccios y Solsticios.

8. Los patrones semianuales de las Hipótesis Equinoccial y de RM poseen los mejores acuerdos con las curvas semianuales observadas de ambos parámetros (Pc5 y electrones de GOES).

Al estudiar los mecanismos dominantes para la Fluencia y las ondas Pc5 por medio de la correlación con los patrones clásicos, se encuentran resultados distintos a los hallados con RBSP y SAMPEX. La Hipótesis Equinoccial es la que domina en la Fluencia, ya que tanto el patrón semianual de ϕ como una dependencia funcional del mismo ($S(\phi)$) arrojan el valor de correlación mas alto con Fl_{SAV} (curva superpuesta de la Fluencia). Además, esta hipótesis también predice mayor cantidad de máximos y mínimos (Tabla 4.4). Es posible que la Variación Semianual esté dominada por distintas hipótesis en distintas regiones de la magnetosfera, pues los datos de RBSP están diseñados para mapear el Cinturón de Radiación Externo (centrado en $L \simeq 4$) en su totalidad y GOES se mantiene en órbita geosíncrona ($L \simeq 6.5$), como ya fue mencionado. En cuanto a la Variación Semianual de Pc5, tanto los valores de correlación con los perfiles semianuales, como la predicción de los máximos y mínimos, sugieren que las teorías Equinoccial y de RM son igualmente importantes para este parámetro.

Constituyentes de la Corriente Anillo

Para el estudio de la Variación Semianual en el segundo conjunto de partículas de este trabajo, que son los constituyentes de la Corriente Anillo terrestre se han utilizado los datos provenientes de un solo instrumento de RBSP que es RBSPICE. Los principales resultados son:

1. La energía contenida por H^+ varía de forma distinta según el canal de energía.

La metodología implementada permitió identificar que en la energía contenida por los flujos omnidireccionales de H^+ (Ec^{H^+}) hay dos regímenes distintos de evolución en el tiempo, que se diferencian según el canal de energía. Los canales mas bajos muestran que ΔEc^{H^+} sigue las variaciones en el índice Dst , mientras que para los canales mas altos ΔEc^{H^+} está anti-correlacionado con este índice. En el caso de la energía contenida por los elementos O^+ y He^+ , se ve que siguen las variaciones del Dst .

Cabe destacar que el año 2013 es crítico a la hora de visualizar el patrón semianual. Al implementar el procedimiento de superposición para estudiar la Variación Semianual de ΔB y Dst se encuentra que no es tan clara como en los electrones relativistas. Teniendo en cuenta que la primer parte del año 2013 presenta valores medidos por debajo de los valores medios, al excluir este año de la superposición el patrón semianual mejora considerablemente. Además, la similitud entre las curvas de Dst y ΔB superpuestos también mejora. En este punto, se puede concluir que para que el patrón semianual sea

mas claro, es de vital importancia la longitud de los datos, ya que seis años de datos (cinco sin contar 2013) representa aproximadamente medio ciclo solar. Esta longitud no genera una señal semianual tan marcada como puede verificarse directamente en la superposición del índice *Dst* en el panel (b) de la Figura 2.16.

2. O^+ y He^+ no contribuyen a las variaciones magnéticas estimadas.

El cálculo de las variaciones magnéticas estimadas por medio de la relación DPS para las tres especies muestra que ΔB^{He^+} y ΔB^{O^+} son despreciables con respecto a ΔB^{H^+} . De modo que la variación estimada total ΔB proviene mayormente del H^+ .

3. La Hipótesis Equinoccial presenta el mejor acuerdo con la Variación Semianual en las variaciones magnéticas estimadas.

Al correlacionar las variaciones magnéticas estimadas superpuestas con los patrones de los ángulos de las tres teorías, se encuentra que la teoría Equinoccial presenta el valor de correlación mas alto. Al igual que en todas las variables estudiadas en este trabajo, la hipótesis Axial presenta el valor de correlación más bajo.

Bibliografía

- Akasofu, S.-I. (1964). The development of the auroral substorm. *Planetary and Space Science*, 12(4), 273–282.
- Azpilicueta, F. & Brunini, C. (2011). A new concept regarding the cause of ionosphere semiannual and annual anomalies. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 116(A1).
- Azpilicueta, F. & Brunini, C. (2012). A different interpretation of the annual and semiannual anomalies on the magnetic activity over the Earth. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 117(A8).
- Baker, D., Mason, G., Figueroa, O., Colon, G., Watzin, J., & Aleman, R. (1993). An overview of the Solar Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer (SAMPEX) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(3), 531–541.
- Baker, D. N. & Blake, J. B. (2013). SAMPEX: A Long-Serving Radiation Belt Sentinel. In *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere* (pp. 21–40). American Geophysical Union.
- Baker, D. N., Erickson, P. J., Fennell, J. F., Foster, J. C., Jaynes, A. N., & Verronen, P. T. (2017). Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts. *Space Science Reviews*, 214(1).
- Baker, D. N., Jaynes, A. N., Kanekal, S. G., Foster, J. C., Erickson, P. J., Fennell, J. F., Blake, J. B., Zhao, H., Li, X., Elkington, S. R., Henderson, M. G., Reeves, G. D., Spence, H. E., Kletzing, C. A., & Wygant, J. R. (2016). Highly relativistic radiation belt electron acceleration, transport, and loss: Large solar storm events of March and June 2015. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 121(7), 6647–6660.
- Baker, D. N., Kanekal, S. G., & Blake, J. B. (2004). Characterizing the Earth's outer Van Allen zone using a radiation belt content index. *Space Weather*, 2(2).
- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Hoxie, V. C., Batiste, S., Bolton, M., Li, X., Elkington, S. R., Monk, S., Reukauf, R., Steg, S., Westfall, J., Belting, C., Bolton, B., Braun, D., Cervelli, B., Hubbell, K., Kien, M., Knappmiller, S., Wade, S., Lamprecht, B., Stevens, K., Wallace, J., Yehle, A., Spence, H. E., & Friedel, R. (2012). The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Instrument on Board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft: Characterization of Earth's Radiation Belt High-Energy Particle Populations. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 337–381.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Pulkkinen, T. I., & Blake, J. B. (1999). Equinoctial and solstitial averages of magnetospheric relativistic electrons: A strong semiannual modulation. *Geophys. Res. Lett.*, 26(20), 3193–3196.
- Balikhin, M. A., Boynton, R. J., Walker, S. N., Borovsky, J. E., Billings, S. A., & Wei, H. L. (2011). Using the NARMAX approach to model the evolution of energetic electrons fluxes at geostationary orbit. *Geophysical Research Letters*, 38(18).
- Baumjohann, W. & Nakamura, R. (2007). Magnetospheric Contributions to the Terrestrial Magnetic Field. In *Treatise on Geophysics* (pp. 77–92). Elsevier.
- Beck, J. G. (2000). A comparison of differential rotation measurements (Invited Review). *Solar Physics*, 191(1), 47–70.
- Blake, J. B., Carranza, P. A., Claudepierre, S. G., Clemmons, J. H., Crain, W. R., Dotan, Y., Fennell, J. F., Fuentes, F. H., Galvan, R. M., George, J. S., Henderson, M. G., Lalic, M., Lin, A. Y., Looper, M. D., Mabry, D. J., Mazur, J. E., McCarthy, B., Nguyen, C. Q., O'Brien, T. P., Perez, M. A., Redding, M. T., Roeder, J. L., Salvaggio, D. J., Sorensen, G. A., Spence, H. E., Yi, S., & Zakrzewski, M. P. (2013). The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) Instruments Aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 383–421.
- Bohlin, J. D. (1977). An observational definition of coronal holes. In J. B. Zirker (Ed.), *Coronal Holes and High Speed Wind Streams* (pp. 27–69).
- Boller, B. R. & Stolov, H. L. (1970). Kelvin-Helmholtz instability and the semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 75(31), 6073–6084.
- Borovsky, J. E. & Valdivia, J. A. (2018). The Earth's Magnetosphere: A Systems Science Overview and Assessment. *Surveys in Geophysics*, 39(5), 817–859.
- Boudouridis, A., Lyons, L. R., Zesta, E., Weygand, J. M., Ribeiro, A. J., & Ruohoniemi, J. M. (2011). Statistical study of the effect of solar wind dynamic pressure fronts on the dayside and nightside ionospheric convection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A10).
- Burton, R. K., McPherron, R. L., & Russell, C. T. (1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research*, 80(31), 4204–4214.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press.
- Chandrasekhar, S. (1960). The virial theorem in hydromagnetics. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1(2), 240–252.
- Chandrasekhar, S. (1962). Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(1), 158–160.

- Claudepierre, S. G., O'Brien, T. P., Blake, J. B., Fennell, J. F., Roeder, J. L., Clemmons, J. H., Looper, M. D., Mazur, J. E., Mulligan, T. M., Spence, H. E., Reeves, G. D., Friedel, R. H., Henderson, M. G., & Larsen, B. A. (2015). A background correction algorithm for Van Allen Probes MagEIS electron flux measurements. *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*.
- Cliwer, E. W., Kamide, Y., & Ling, A. G. (2000). Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A2), 2413–2424.
- Cliwer, E. W., Kamide, Y., & Ling, A. G. (2002). The semiannual variation of geomagnetic activity : phases and profiles for 130 years of aa data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 47–53.
- Cliwer, E. W., Kamide, Y., Ling, A. G., & Yokoyama, N. (2001). Semiannual variation of the geomagnetic Dst index: Evidence for a dominant nonstorm component. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A10), 21297–21304.
- Cliwer, E. W., Svalgaard, L., & Ling, A. G. (2004). Origins of the semiannual variation of geomagnetic activity in 1954 and 1996. *Annales Geophysicae*, 22(1), 93–100.
- Cortie, A. L. (1912). Sun-spots and Terrestrial Magnetic Phenomena, 1898-1911: the Cause of the Annual Variation in Magnetic Disturbances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 73(1), 52–60.
- Coxon, J. C., Milan, S. E., Clausen, L. B. N., Anderson, B. J., & Korth, H. (2014). The magnitudes of the regions 1 and 2 Birkeland currents observed by AMPERE and their role in solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12), 9804–9815.
- Crooker, N. U. & Siscoe, G. L. (1986). On the limits of energy transfer through dayside merging. *Journal of Geophysical Research*, 91(A12), 13393.
- Daglis, I. A., Thorne, R. M., Baumjohann, W., & Orsini, S. (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Reviews of Geophysics*, 37(4), 407–438.
- Dessler, A. J. & Parker, E. N. (1959). Hydromagnetic theory of geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2239–2252.
- Dungey, J. W. (1961). Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6(2), 47–48.
- Dungey, J. W. (1963). Interactions of solar plasma with the geomagnetic field. *Planet. Space Sci.*, 10, 233–237.
- Dungey, J. W. (1965). Effects of electromagnetic perturbations on particles trapped in the radiation belts. *Space Sci. Rev.*, 4(2), 199–222.

BIBLIOGRAFÍA

- Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., Blake, J. B., O'Brien, T. P., Clemmons, J. H., Baker, D. N., Spence, H. E., & Reeves, G. D. (2015). Van Allen Probes show that the inner radiation zone contains no MeV electrons: ECT/MagEIS data. *Geophysical Research Letters*.
- Finch, I. & Lockwood, M. (2007). Solar wind-magnetosphere coupling functions on timescales of 1 day to 1 year. *Annales Geophysicae*, 25(2), 495–506.
- Frank, L. A. (1967). On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 72(15), 3753–3767.
- Fraser-Smith, A. C. (1987). Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles, 1600–1985. *Reviews of Geophysics*, 25(1), 1.
- Funsten, H. O., Skoug, R. M., Guthrie, A. A., MacDonald, E. A., Baldonado, J. R., Harper, R. W., Henderson, K. C., Kihara, K. H., Lake, J. E., Larsen, B. A., Puckett, A. D., Vigil, V. J., Friedel, R. H., Henderson, M. G., Niehof, J. T., Reeves, G. D., Thomsen, M. F., Hanley, J. J., George, D. E., Jahn, J.-M., Cortinas, S., Santos, A. D. L., Dunn, G., Edlund, E., Ferris, M., Freeman, M., Maple, M., Nunez, C., Taylor, T., Toczynski, W., Urdiales, C., Spence, H. E., Cravens, J. A., Suther, L. L., & Chen, J. (2013). Helium, Oxygen, Proton, and Electron (HOPE) Mass Spectrometer for the Radiation Belt Storm Probes Mission. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 423–484.
- Gloeckler, G., Wilken, B., Stüdemann, W., Ipavich, F. M., Hovestadt, D., Hamilton, D. C., & Kremser, G. (1985). First composition measurement of the bulk of the storm-time ring current (1 to 300 keV/e) with AMPTE-CCE. *Geophysical Research Letters*, 12(5), 325–328.
- Greenspan, M. E. & Hamilton, D. C. (2000). A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A3), 5419–5430.
- Hamilton, D. C., Gloeckler, G., Ipavich, F. M., Stüdemann, W., Wilken, B., & Kremser, G. (1988). Ring current development during the great geomagnetic storm of february 1986. *Journal of Geophysical Research*, 93(A12), 14343.
- Jacobs, J. A., Kato, Y., Matsushita, S., & Troitskaya, V. A. (1964). Classification of Geomagnetic Micropulsations. *Geophysical Journal International*, 8(3), 341–342.
- Jaynes, A. N., Baker, D. N., Singer, H. J., Rodriguez, J. V., Loto'aniu, T. M., Ali, A. F., Elkington, S. R., Li, X., Kanekal, S. G., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., Li, W., Thorne, R. M., Kletzing, C. A., Spence, H. E., & Reeves, G. D. (2015). Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(9), 7240–7254.
- Jaynes, A. N., Li, X., Schiller, Q. G., Blum, L. W., Tu, W., Turner, D. L., Ni, B., Bortnik, J., Baker, D. N., Kanekal, S. G., Blake, J. B., & Wygant, J. (2014). Evolution of relativistic

- outer belt electrons during an extended quiescent period. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12), 9558–9566.
- Kanekal, S. G., Baker, D. N., & McPherron, R. L. (2010). On the seasonal dependence of relativistic electron fluxes. *Ann. Geophys.*, 28(5), 1101–1106.
- Khazanov, G. (2016). *Space Weather Fundamentals*. CRC Press.
- Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Acuna, M., MacDowall, R. J., Torbert, R. B., Averkamp, T., Bodet, D., Bounds, S. R., Chutter, M., Connerney, J., Crawford, D., Dolan, J. S., Dvorsky, R., Hospodarsky, G. B., Howard, J., Jordanova, V., Johnson, R. A., Kirchner, D. L., Mokrzycki, B., Needell, G., Odom, J., Mark, D., Pfaff, R., Phillips, J. R., Piker, C. W., Remington, S. L., Rowland, D., Santolik, O., Schnurr, R., Sheppard, D., Smith, C. W., Thorne, R. M., & Tyler, J. (2013). The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 127–181.
- Konstantinidis, K. & Sarris, T. (2015). Calculations of the integral invariant coordinates I and L^* in the Magnetosphere and mapping of the regions where I is conserved, using a particle tracer (ptr3D v2.0), LANL*, SPENVIS, and IRBEM. *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2967–2975.
- Korth, A., Friedel, R. H. W., Mouikis, C. G., Fennell, J. F., Wygant, J. R., & Korth, H. (2000). Comprehensive particle and field observations of magnetic storms at different local times from the CRRES spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A8), 18729–18740.
- Krimigis, S. M., Gloeckler, G., McEntire, R. W., Potemra, T. A., Scarf, F. L., & Shelley, E. G. (1985). Magnetic storm of September 4, 1984: A synthesis of ring current spectra and energy densities measured with AMPTE/CCE. *Geophysical Research Letters*, 12(5), 329–332.
- Krimigis, S. M., Haerendel, G., McEntire, R. W., Paschmann, G., & Bryant, D. A. (1982). The Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers (AMPTE) program. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 63(45), 843.
- Lam, H.-L. (2011). From Early Exploration to Space Weather Forecasts: Canada’s Geomagnetic Odyssey. *Space Weather*, 9(5).
- Lam, H.-L. (2017). On the predictive potential of Pc5 ULF waves to forecast relativistic electrons based on their relationships over two solar cycles. *Space Weather*, 15(1), 163–179.
- Langel, R. A. & Estes, R. H. (1985). Large-scale, near-field magnetic fields from external sources and the corresponding induced internal field. *Journal of Geophysical Research*, 90(B3), 2487.

BIBLIOGRAFÍA

- Laundal, K. M. & Richmond, A. D. (2016). Magnetic Coordinate Systems. *Space Science Reviews*, 206(1-4), 27–59.
- Li, X., Baker, D. N., Kanekal, S. G., Looper, M., & Temerin, M. (2001). Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations. *Geophysical Research Letters*, 28(20), 3827–3830.
- Li, X., Selesnick, R. S., Baker, D. N., Jaynes, A. N., Kanekal, S. G., Schiller, Q., Blum, L., Fennell, J., & Blake, J. B. (2015). Upper limit on the inner radiation belt MeV electron intensity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.
- Lockwood, M., Owens, M. J., Barnard, L. A., Bentley, S., Scott, C. J., & Watt, C. E. (2016). On the origins and timescales of geoeffective IMF. *Space Weather*, 14(6), 406–432.
- Lyons, L. R., Thorne, R. M., & Kennel, C. F. (1972). Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research*, 77(19), 3455–3474.
- McIlwain, C. E. (1961). Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *Journal of Geophysical Research*, 66(11), 3681–3691.
- Meredith, N. P., Horne, R. B., Isles, J. D., & Rodriguez, J. V. (2015). Extreme relativistic electron fluxes at geosynchronous orbit: Analysis of GOES $E > 2$ MeV electrons. *Space Weather*, 13(3), 170–184.
- Millan, R. & Thorne, R. (2007). Review of radiation belt relativistic electron losses. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3), 362–377.
- Ni, B., Zou, Z., Li, X., Bortnik, J., Xie, L., & Gu, X. (2016). Occurrence characteristics of outer zone relativistic electron butterfly distribution: A survey of Van Allen Probes REPT measurements. *Geophysical Research Letters*, 43(11), 5644–5652.
- Olbert, S., Siscoe, G. L., & Vasyliunas, V. M. (1968). A simple derivation of the Dessler-Parker-Sckopke relation. *Journal of Geophysical Research*, 73(3), 1115–1116.
- Olson, W. P. (1974). A model of the distributed magnetospheric currents. *Journal of Geophysical Research*, 79(25), 3731–3738.
- Onsager, T. G. (2004). The radial gradient of relativistic electrons at geosynchronous orbit. *Journal of Geophysical Research*, 109(A5).
- Owens, M. J. & Forsyth, R. J. (2013). The Heliospheric Magnetic Field. *Living Reviews in Solar Physics*, 10.
- Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *The Astrophysical Journal*, 128, 664.

- Pedatella, N. M., Forbes, J. M., Maute, A., Richmond, A. D., Fang, T.-W., Larson, K. M., & Millward, G. (2011). Longitudinal variations in the F region ionosphere and the topside ionosphere-plasmasphere: Observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A12).
- Perreault, P. & Akasofu, S.-I. (1978). A study of geomagnetic storms. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 54(3), 547–573.
- Petschek, H. E. (1964). Magnetic Field Annihilation. *NASA [Spec. Publ.] SP*, 50, 425.
- Pneuman, G. W. & Kopp, R. A. (1971). Gas-magnetic field interactions in the solar corona. *Solar Physics*, 18(2), 258–270.
- Poblet, F. L. & Azpilicueta, F. (2018). 27-day variation in solar-terrestrial parameters: Global characteristics and an origin based approach of the signals. *Adv. Space Res.*, 61(9), 2275–2289.
- Prölss, G. W. (2004). *Physics of the Earth's Space Environment*. Springer Berlin Heidelberg.
- Pulkkinen, T. (2007). Space Weather: Terrestrial Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4.
- Reeves, G. D., Friedel, R. H. W., Larsen, B. A., Skoug, R. M., Funsten, H. O., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., Turner, D. L., Denton, M. H., Spence, H. E., Blake, J. B., & Baker, D. N. (2016). Energy-dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(1), 397–412.
- Reeves, G. D., Spence, H. E., Henderson, M. G., Morley, S. K., Friedel, R. H. W., Funsten, H. O., Baker, D. N., Kanekal, S. G., Blake, J. B., Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., Thorne, R. M., Turner, D. L., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Larsen, B. A., & Niehof, J. T. (2013). Electron Acceleration in the Heart of the Van Allen Radiation Belts. *Science*, 341(6149), 991–994.
- Riley, P. (2002). Modeling the heliospheric current sheet: Solar cycle variations. *Journal of Geophysical Research*, 107(A7).
- Roederer, J. G. (1970). *Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation*. Springer Berlin Heidelberg.
- Roederer, J. G. & Zhang, H. (2014). *Dynamics of Magnetically Trapped Particles*. Springer Berlin Heidelberg.
- Roosen, J. (1966). The seasonal variation of geomagnetic disturbance amplitudes. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 18.
- Rosales, S., Pais, M. A., & Fernandes, J. (2018). *Global and mid-latitude impact of ten years of solar activity using observational data of the Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra*. PhD thesis.

BIBLIOGRAFÍA

- Russell, C. T. & McPherron, R. L. (1973). Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 78(1), 92–108.
- Sabine, E. (1852). VIII. On periodical laws discoverable in the mean effects of the larger magnetic disturbance.—no. II. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 142, 103–124.
- Schulz, M. & Lanzerotti, L. J. (1974). *Particle Diffusion in the Radiation Belts*. Springer Berlin Heidelberg.
- Sckopke, N. (1966). A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the earth. *Journal of Geophysical Research*, 71(13), 3125–3130.
- Shue, J.-H., Hsieh, Y.-K., Tam, S. W. Y., Wang, K., Fu, H. S., Bortnik, J., Tao, X., Hsieh, W.-C., & Pi, G. (2015). Local time distributions of repetition periods for rising tone lower band chorus waves in the magnetosphere. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8294–8301.
- Sugiura, M. (1964). Hourly values of equatorial Dst for the IGY. *Ann. Int. Geophys.*
- Summers, D., Thorne, R. M., & Xiao, F. (1998). Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A9), 20487–20500.
- Svalgaard, L. (1977). Geomagnetic activity: Dependence on solar wind parameters. *Skylab Workshop Monograph on “Coronal holes”*.
- Svalgaard, L. (2005). Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophys. Res. Lett.*, 32(1).
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., L  ger, J.-M., Lesur, V., Lowes, F. J., Macmillan, S., Manda, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T. J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., T  ffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I., & Zvereva, T. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1).
- Thorne, R. M., Li, W., Ni, B., Ma, Q., Bortnik, J., Chen, L., Baker, D. N., Spence, H. E., Reeves, G. D., Henderson, M. G., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Hospodarsky, G. B., Blake, J. B., Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., & Kanekal, S. G. (2013). Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus. *Nature*, 504(7480), 411–414.

- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L. C., Guarnieri, F. L., Gopalswamy, N., Grande, M., Kamide, Y., Kasahara, Y., Lu, G., Mann, I., McPherron, R., Soraas, F., & Vasyliunas, V. (2006). Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *Journal of Geophysical Research*, 111(A7).
- Tsyganenko, N. A. (2005). Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 110(A3).
- Tsyganenko, N. A. (2013). Data-based modelling of the Earth's dynamic magnetosphere: a review. *Annales Geophysicae*, 31(10), 1745–1772.
- Turner, N. E., Baker, D. N., Pulkkinen, T. I., Roeder, J. L., Fennell, J. F., & Jordanova, V. K. (2001). Energy content in the storm time ring current. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A9), 19149–19156.
- Ukhorskiy, A. Y., Takahashi, K., Anderson, B. J., & Korth, H. (2005). Impact of toroidal ULF waves on the outer radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A10).
- Van Allen, J. A. (1957). Direct Detection of Auroral Radiation with Rocket Equipment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 43(1), 57–62.
- Vichare, G., Rawat, R., Jadhav, M., & Sinha, A. K. (2017). Seasonal variation of the Sq focus position during 2006-2010. *Adv. Space Res.*, 59(2), 542–556.
- Williams, D. (1981). Ring current composition and sources: An update. *Planetary and Space Science*, 29(11), 1195–1203.
- Wygant, J. R., Bonnell, J. W., Goetz, K., Ergun, R. E., Mozer, F. S., Bale, S. D., Ludlam, M., Turin, P., Harvey, P. R., Hochmann, R., Harps, K., Dalton, G., McCauley, J., Rachelson, W., Gordon, D., Donakowski, B., Shultz, C., Smith, C., Diaz-Aguado, M., Fischer, J., Heavner, S., Berg, P., Malsapina, D. M., Bolton, M. K., Hudson, M., Strangeway, R. J., Baker, D. N., Li, X., Albert, J., Foster, J. C., Chaston, C. C., Mann, I., Donovan, E., Cully, C. M., Cattell, C. A., Krasnoselskikh, V., Kersten, K., Brenneman, A., & Tao, J. B. (2013). The Electric Field and Waves Instruments on the Radiation Belt Storm Probes Mission. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 183–220.
- Yamamoto, T. (1988). On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 93(A2), 897–911.
- Ypma, T. J. (1995). Historical Development of the Newton-Raphson Method. *SIAM Review*, 37(4), 531–551.
- Zhao, H., Li, X., Baker, D. N., Fennell, J. F., Blake, J. B., Larsen, B. A., Skoug, R. M., Funsten, H. O., Friedel, R. H. W., Reeves, G. D., Spence, H. E., Mitchell, D. G., Lanzerotti,

BIBLIOGRAFÍA

L. J., & Rodriguez, J. V. (2015). The evolution of ring current ion energy density and energy content during geomagnetic storms based on Van Allen Probes measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(9), 7493–7511.

Artículos publicados en el transcurso del doctorado



27-day variation in solar-terrestrial parameters: Global characteristics and an origin based approach of the signals

Facundo L. Poblet^{*}, Francisco Azpilicueta

Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata, Argentina

Received 20 April 2017; received in revised form 24 January 2018; accepted 13 February 2018

Available online 2 March 2018

Abstract

The Earth and the near interplanetary medium are affected by the Sun in different ways. Those processes generated in the Sun that induce perturbations into the Magnetosphere-Ionosphere system are called geoeffective processes and show a wide range of temporal variations, like the 11-year solar cycle (long term variations), the variation of ~ 27 days (recurrent variations), solar storms enduring for some days, particle acceleration events lasting for some hours, etc.

In this article, the periodicity of ~ 27 days associated with the solar synodic rotation period is investigated. The work is mainly focused on studying the resulting 27-day periodic signal in the magnetic activity, by the analysis of the horizontal component of the magnetic field registered on a set of 103 magnetic observatories distributed around the world. For this a new method to isolate the periodicity of interest has been developed consisting of two main steps: the first one consists of removing the linear trend corresponding to every calendar year from the data series, and the second one of removing from the resulting series a smoothed version of it obtained by applying a 30-day moving average. The result at the end of this process is a data series in which all the signal with periods larger than 30 days are canceled.

The most important characteristics observed in the resulting signals are two main amplitude modulations: the first and most prominent related to the 11-year solar cycle and the second one with a semiannual pattern. In addition, the amplitude of the signal shows a dependence on the geomagnetic latitude of the observatory with a significant discontinuity at approx. $\pm 60^\circ$.

The processing scheme was also applied to other parameters that are widely used to characterize the energy transfer from the Sun to the Earth: F10.7 and Mg II indices and the ionospheric vertical total electron content (vTEC) were considered for radiative interactions; and the solar wind velocity for the non-radiative interactions between the solar wind and the magnetosphere. The 27-day signal obtained in the magnetic activity was compared with the signals found in the other parameters resulting in a series of cross-correlations curves with maximum correlation between 3 and 5 days of delays for the radiative and between 0 and 1 days of delay for the non-radiative parameters. This result supports the idea that the physical process responsible for the 27-day signal in the magnetic activity is related to the solar wind and not to the solar electromagnetic radiation.

© 2018 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: 27-day variation; Solar wind; Solar radiation; Cross-correlation

1. Introduction

The gaseous plasma composition of the Sun induces an un-uniform rotation around its axis with a dependence on the heliographic latitude. The rotation rate is observed to

be fastest at the equator and decreases toward the poles. The sidereal rotation period according to the Carrington definition is of ~ 25.3 days at a latitude of 26° . This period should not be confused with the synodic rotation period of ~ 27.2 days which is the time for a fixed point on the Sun to rotate to the same apparent position as viewed from Earth (Beck, 2000).

^{*} Corresponding author.

E-mail address: fpoblet@fcaglp.unlp.edu.ar (F.L. Poblet).

The effects of the synodic rotation period can be detected in many parameters measured on the Earth and can be roughly classified by their origin in two groups: (i) signals generated by phenomena related to the entrance of charged solar wind particles into the magnetosphere and (ii) signals generated by phenomena related to the solar radiation.

In the first group, the most important physical parameters to detect a 27-day signal are the usual variables that characterize the solar wind: density, velocity and interplanetary magnetic field (IMF) intensity, which at the orbit of the Earth have mean values of 4 cm^{-3} , $400\text{--}500 \text{ km s}^{-1}$ and 5 nT respectively (see (Pröls, 2004), Ch. 6). The variability of the magnetic field observed near the Earth is primarily driven by the magnetic reconnection between the IMF and the geomagnetic field. The fact that the geomagnetic dipole is approximately perpendicular to the ecliptic plane makes the reconnection rate dependent on the southward component of the IMF, and proportional to the Y component of the motional electric field ($\mathbf{E} = -\mathbf{v}_{\text{sw}} \times \mathbf{B}_{\text{IMF}}$) of the solar wind (Vasyliunas, 1975). Hence, coherent solar wind structures containing southward magnetic field components and high velocities are thus most efficient drivers in the transference of energy into the magnetosphere. Among these coherent structures are high-speed streams (HSS) emanated from near-equatorial coronal holes and corotating interaction regions (CIR) arising from the interaction of the rotating HSS with the upstream slower-speed stream. Both can generate moderate geomagnetic activity with a 27-day recurrence (Tsurutani et al., 2006).

The 27-day variation in the magnetic activity has been studied by many authors. Its existence is well documented in classic works like (Fraser-Smith, 1972; Sargent, 1986; Shapiro and Ward, 1966 and Ward, 1960). One of the preferred techniques to studying it was the signal spectrum calculation of several magnetic indices. The spectrum of the geomagnetic activity is quite complex for periods around 27 days. In fact, this complexity led some authors to investigate subsidiary peaks near the frequency associated to the 27-day period and interpreted them as modulations. The subsidiary peaks contain information about other periodicities like the semiannual, annual or the 11-year (solar cycle) variation (see for example (Clúa de Gonzalez et al., 1993) or (Střeštík, 1998)). Besides the fact that several different phenomena can contribute to periodicities around 27 days, there is an intrinsic temporal variation in the period (it is not constant in time) that could make Fourier analyses not adequate to study this variation in long data sequences, as suggested by Schreiber (1998).

In the second group, the 27-day signals are produced by the solar radiation in a process that can be simplified as follows: while the Sun rotates around its axis, the Earth projection over the solar disc is affected by different radiative regions that are distributed in-homogeneously around the disc, resulting in a change of the radiation flux that reaches

the upper layers of the terrestrial atmosphere. The radiation corresponding to the extreme ultra-violet (EUV) and X bands ionizes the neutral elements of the atmosphere and then generates the ionosphere. Therefore, there exist a close connection between the temporal variations in the solar radiation and in the generation and destruction of ions in the ionosphere-thermosphere system. The 27-day variation resulted from this process has been studied by different authors, including global analyses where the periodicities in variables like total electron content and the electron density are considered in the ionosphere at a global scale (Afraimovich et al., 2006; Hocke, 2008), or even localized analyses focused on specific ionospheric layers like the articles of Min et al. (2009) and Reuveni and Price (2009).

The study of the 27-day signal combining different Sun-Earth parameters has also served to study other less known phenomena like the 22-year cycle in the magnetic activity (Apostolov et al., 2004; Cliver et al., 1996). According to these references, the 22-year variation is the result of an asymmetry between the Northern and the Southern Hemispheres of the Sun.

In this work, the 27-day pattern that the synodic period produces over a variety of solar-terrestrial measurements was investigated. The study was focused in the magnetic data utilizing the horizontal component (H) of the magnetic field measured at several geomagnetic observatories and the main goal was to characterize the global aspects of this variation. The same methodology was applied to other solar terrestrial measurements for the purposes of comparing results. These parameters are: the solar radiative proxies F10.7 and Mg II, ionospheric $v\text{TEC}$ and solar wind speed (v_{sw}). All the analyses were done by means of less restrictive statistical techniques like the calculation of auto-correlation and cross-correlation parameters, moving averages and standard deviations.

The article is structured as follows: Sections 2 and 3 explain in detail the data that were utilized and the processing sequence that was applied to it. In Sections 4 and 6 the results of the different correlation studies are presented while the characterization of the 27-day signal of each quantity investigated is analyzed in Section 5.

2. The data

This section describes the data that were utilized on this work. All the cited websites were publicly available at the moment of the elaboration of this paper, approximately in April 2017.

2.1. Magnetic data - H

As it was mentioned in Section 1, the focus of this work is the magnetic activity. Specifically, the analysis was based on the horizontal component of the Earth's magnetic field (H) observed at several magnetic observatories/stations

distributed around the world. The data were taken from the “World Data center for Geomagnetism (Edinburgh)” (WDC) website: ftp://ftp.nmh.ac.uk/wdc/obsdata/hourval/single_obs/. The majority of the observatories are part of the INTERMAGNET global network (<http://www.intermagnet.org/index-eng.php>) and provide data with the most modern standards.

The use of raw magnetic data was preferred instead of magnetic indices for two reasons. The first one was to avoid any effect arising from the elaboration of the indices. The aim of an index is at giving summarized information in a continuous way concerning a more or less complex phenomenon which varies with time. Thus, theoretical assumptions are made to calculate and use them as products. Different results can appear when processing indices or raw data. The second reason was that the characterization of the 27-day variation dependence on latitude can only be made by taking data from magnetic observatories. Magnetic indices are elaborated using data from a small number of observatories (e.g. Ap) usually distributed at particular latitudinal ranges (e.g. AE, Dst).

Fig. 1 presents an example of the H component of the geomagnetic field, showing daily mean values measured at 2 observatories: Niemegek (NGK), Germany, and Hermanus (HER), South Africa, located at geomagnetic coordinates (51.64, 97.64) and (−34.0, 85.2) respectively. The graphics show different features that depend on the observatory and the year. For instance, NGK shows jumps in 1905, 1908 and 1932 that cannot be associated with natural processes and must be the result of changes in the magnetometers configuration or in the baseline calculation. Besides some data gaps can be seen between 1945 and 1946. Also, the time span is quite different for the two observatories. Finally, in HER a long term negative variation can be observed associated with the secular variation of the main geomagnetic field.

The two elements previously mentioned were considered for selecting the WDC stations used in this work and

resulted in the following filtering conditions: (i) only days with measurements on the 24 h were utilized; (ii) years with at least 330 days with data were selected; (iii) those years that presented a sudden jump in the data, clearly not associated to a natural process but to any problem with the instrument were excluded; (iv) only observatories with at least 15 years of data were included. The result was a set of 103 observatories, listed in Table 1, with good coverage in the Northern Hemisphere and rather good in the Southern Hemisphere. As it is expected the number of observatories in the Southern Hemisphere is significantly lower.

2.2. Solar parameters - F10.7 and Mg II

As it was mentioned in Section 1, solar radiation at EUV frequencies ionizes the neutral elements of the atmosphere that subsequently produce electrical currents. Specifically, these fluxes are responsible for the ionization of the O, O₂, NO and other molecules that produce most of the free electrons that forms the terrestrial ionosphere. Therefore, it is important to monitor the radiation in these high frequencies in order to relate them with the behaviour of the electron content parameters (details about this will appear in see Sections 5 and 6). To do this, two proxies of the EUV radiation were used. The first one is the Mg II core-to-wing index. It is derived by taking the ratio of the *h* and *k* lines of the solar Mg II emission at 280 nm. Viereck et al. (2001) calculated a 0.996 correlation coefficient between this index and the EUV radiation flux at 30.4 nm, hence it is an excellent indicator of the radiation level at this frequencies. The Mg II index is derived from satellite measurements and is provided by NOAA (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_UV/NOAAMgII.dat) as a time series of daily averages since 1978, including more than two solar cycles that are shown with gray dots in Fig. 2.

The second proxy used is the F10.7 index that measures the average energy of the solar flux density at 2.8 GHz

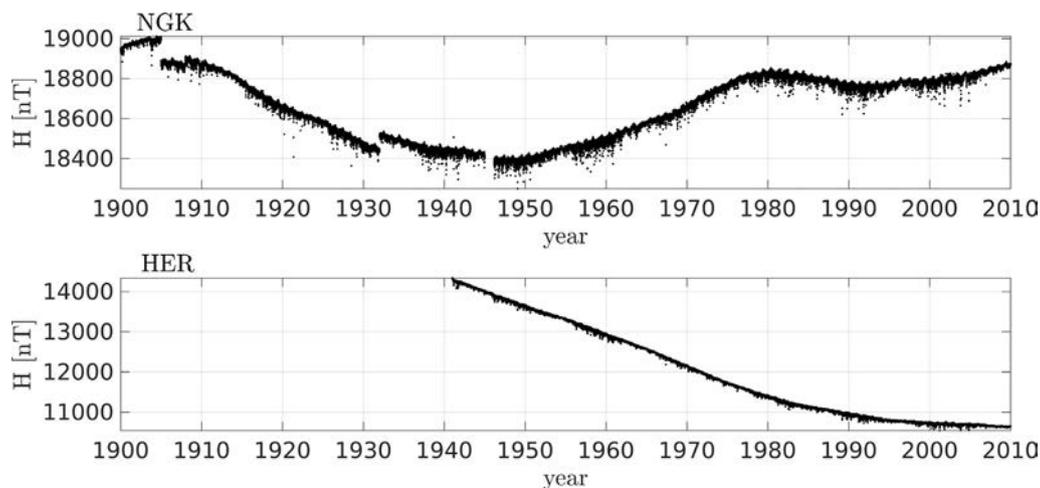


Fig. 1. H component of the Earth magnetic field. Mean daily values for 2 permanent observatories. One located in the Northern Hemisphere (up) and the other in the Southern Hemisphere (down). Note the differences in the absolute values of H in the y-axis.

Table 1

List of the observatories used in this work with the geomagnetic dipole longitudes (θ_m) and latitudes (ϕ_m), ordered by geomagnetic latitude. For details about the observatories information the reader can go to: ftp://ftp.nmhc.ac.uk/wdc/obsdata/hourval/single_obs/.

#	ID	θ_m [°]	ϕ_m [°]	#	ID	θ_m [°]	ϕ_m [°]
1	THL	14.33	87.10	53	NVS	159.97	45.87
2	MBC	-90.80	80.00	54	THY	100.63	45.76
3	GDH	33.71	77.88	55	ODE	112.77	43.56
4	CBB	-53.68	76.20	56	FRN	-53.36	43.11
5	HRN	124.72	74.02	57	IRT	177.56	42.31
6	BLC	-35.50	72.67	58	AQU	94.75	42.13
7	BRW	-111.48	69.86	59	PAG	105.22	40.47
8	NAQ	38.57	69.18	60	YSS	-149.52	38.61
9	LRV	70.44	68.85	61	TFS	124.19	36.92
10	YKC	-58.20	68.61	62	MMB	-147.76	35.72
11	CCS	178.24	67.96	63	VLA	-158.31	34.58
12	FCC	-29.69	67.36	64	AAA	153.28	34.54
13	TRO	115.57	67.22	65	TEN	61.32	33.35
14	ABK	114.05	66.04	66	TKT	146.54	33.25
15	DIK	162.67	64.42	67	ASH	135.59	31.12
16	MMK	125.47	63.86	68	BJI	-172.18	30.28
17	LER	88.58	61.59	69	TEO	-28.55	28.22
18	MEA	-51.90	61.17	70	KAK	-150.32	27.76
19	SIT	-77.69	60.21	71	SJG	46.95	27.63
20	YAK	-111.60	59.63	72	KNZ	-150.41	26.77
21	NUR	112.98	57.79	73	TAM	82.32	24.31
22	LOV	106.17	57.76	74	HON	-89.18	21.65
23	ESK	83.61	57.42	75	SSH	-167.28	21.50
24	STJ	24.64	56.37	76	MBO	58.14	19.60
25	LNN	117.94	56.33	77	LNP	-167.03	15.43
26	RSV	99.23	55.31	78	FUQ	-1.15	15.12
27	BFE	98.37	55.22	79	GZH	-174.36	13.31
28	OTT	-3.58	54.88	80	ABG	146.89	10.47
29	NEW	-53.65	54.46	81	GUA	-143.50	05.75
30	WNG	94.94	53.85	82	AAE	112.53	05.34
31	VIC	-60.75	53.81	83	BNG	91.92	04.15
32	HAD	80.18	53.47	84	ANN	152.85	02.69
33	WIT	92.17	53.36	85	TRD	149.94	00.05
34	BOX	124.15	53.29	86	VSS	27.48	-13.72
35	HLP	104.59	53.07	87	PPT	-74.26	-15.03
36	MGD	-145.50	52.40	88	API	-96.69	-15.07
37	POD	166.40	51.89	89	PMG	-138.77	-16.71
38	NGK	97.64	51.64	90	TSU	86.98	-18.87
39	DOU	88.94	51.09	91	HER	85.27	-34.00
40	MOS	121.64	51.05	92	GNA	-170.29	-41.18
41	BEL	105.21	50.07	93	CNB	-132.56	-42.03
42	KZN	131.74	49.84	94	AMS	145.59	-45.86
43	CLF	85.78	49.47	95	EYR	-105.94	-46.64
44	SVD	142.31	49.33	96	CZT	114.90	-51.06
45	ARS	140.14	49.29	97	AIA	6.21	-55.49
46	FUR	94.72	48.09	98	PAF	134.42	-56.46
47	BOU	-38.02	47.87	99	MAW	113.00	-73.03
48	LVV	107.22	47.72	100	DRV	-129.37	-73.87
49	FRD	-5.55	47.66	101	MIR	156.48	-75.61
50	KIV	113.55	47.48	102	SBA	-72.30	-78.97
51	HRB	101.25	46.66	103	VOS	176.99	-88.06
52	PET	-137.40	46.12				

(10.7 cm wavelength) in solar flux units (1 sfu = 10^{-22} Wm $^{-2}$ Hz $^{-1}$). Unlike other EUV radiation proxies, F10.7 can be measured at the terrestrial surface thus being an easy-to-obtain variable with reliable values. This index database starts in 1947 being considerable longer than the Mg II series. F10.7 daily values were taken from the Goddard Space Flight Center website: ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/; and are represented

by the black dots (left scale) in Fig. 2. The data cover the last six solar cycles and show an increase of the amplitude and dispersion during the years of maximum activity.

2.3. Ionospheric *vTEC*

The total electron content (TEC) is defined as the total number of free electrons that an electromagnetic wave

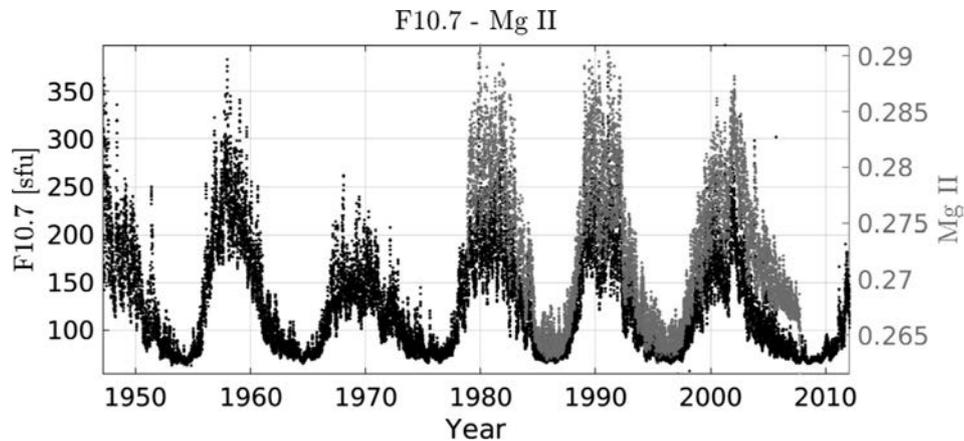


Fig. 2. Daily values of F10.7 [sfu] (black dots – left scale) and Mg II (gray dots – right scale).

encounters when it crosses the ionosphere. Its unit is the TECU (1 TECU = 10^{16} el m^{-2}) and when the path of the wave is vertical to the surface it is called vTEC. One of the first missions that successfully measured direct vTEC values was TOPEX/Poseidon (see the article of Jee (2004) for details). The mission was designed to map the ocean height to study oceanic circulation processes, but the incorporation of a double frequency altimeter provided the aeronomic community a continuous 13-year sequence of highly precision vTEC data for the specific studies. The satellite orbited at an altitude of 1336 km, providing vTEC measurements of the complete ionospheric vertical profiles. For this work the complete data series was used and was obtained from the following website: <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/SeaSurfaceTopography/topex/L2/mgdrb/>.

The original 1-s TOPEX vTEC values were averaged to obtain a daily global mean vTEC. Due to several design considerations, the TOPEX instrument only provided vTEC measurements over the sea surface. The asymmetric continental and oceanic distribution between the Northern and Southern Hemisphere produced an asymmetry in the number of samples over each hemisphere. To balance this disproportion a geographic filter was applied, using only measurements within the sectors defined by $(150^\circ, 240^\circ)$

and $(300^\circ, 360^\circ)$ in longitude; and $(-60^\circ, 60^\circ)$ in latitude. Fig. 3 shows the daily values obtained with the TOPEX/Poseidon.

2.4. Solar wind parameters

For monitoring the state of the solar wind the chosen variable was the Solar wind speed. This parameter was considered since the solar wind plasma has a strong oscillation with a period of ~ 27 days affecting the magnetospheric particle precipitation rate, the geomagnetic activity, and the electric currents of the terrestrial ionosphere (Tsurutani et al., 2006). Daily averages of the solar wind bulk flow speed were taken from the OMNI website: ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/. The data series starts at the year 1963. Fig. 4 shows the histogram of the v_{sw} complete series, with values varying between 250 and 850 km/s. The histogram shows that it is relatively infrequent to find days where the fast solar wind dominates over the slow solar wind. In Burlaga and Szabo (1999) this conclusion is supported by developing log-normal fits to several solar wind parameters. Moreover a simple analysis of the median and the mean of the data sequence corroborate this argument. The median is often

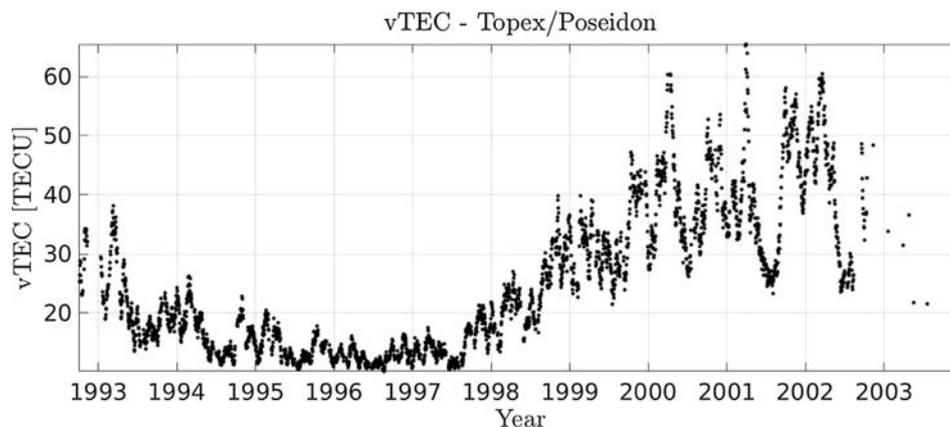


Fig. 3. vTEC daily values from TOPEX/Poseidon mission.

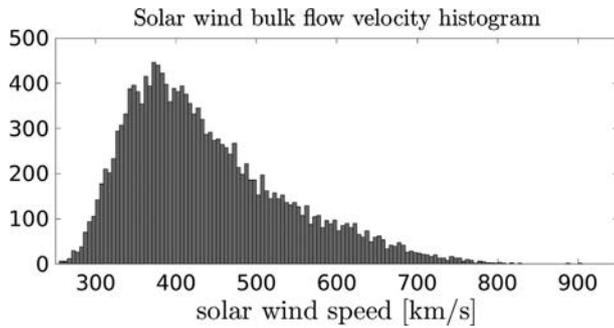


Fig. 4. Histogram of the solar wind bulk flow speed. The data were grouped in 5 km/s bins.

used as an averaged value of a set of data and its basic advantage compared to the mean is that it is not skewed so much by extremely large or small values, and so it may give a better idea of a “typical” value. In this case, it represents a common value for the slow solar wind speed and is 413 km/s. As it was expected, the mean value was slightly higher around 438 km/s, due to the fast solar wind contribution.

3. Methodology

In order to extract the signal from the parameters presented in Section 2, a processing scheme was applied to all of them that produced temporal sequences of daily mean values with the 27-day variation present (to be more precise with all those signals with periods smaller than 30 days). The solar radiative indices, the ionospheric $vTEC$ and the solar wind velocity the sequences were already formed by daily values. But this was not the case for the magnetic data, so the 24 hourly H values were averaged for every day and for every observatory. The steps of the processing sequence that followed will be explained for the magnetic data but were the same for the other parameters.

For each analyzed year, a linear trend (based on a least square fitting algorithm) was calculated with the daily values of H and then subtracted from them. This method is equivalent to removing the secular tendency of the data considering each year separately and differs from the classic procedures in which the data from previous years are considered. For example in the Dst index elaboration, a quadratic fit of annual mean values using the 4 years previous to the year of interest is subtracted from H (Sugiura et al., 1964). In this work instead, only the values of one year are considered to remove the secular tendency.

Subtracting the annual trend has a similar effect of applying a low pass filter to the data. The results at this stage can be seen in Fig. 5, showing the deviations from the linear trend for two particular years, 2001 and 1996, of high and low solar activity respectively, at HER observatory. The main feature of both curves is a pattern with to have two minimums near the Days Of Year (DOYs)

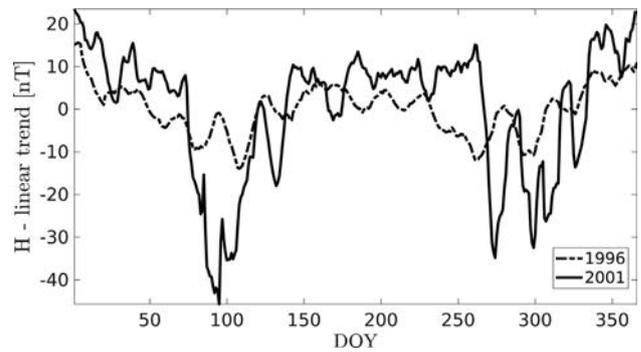


Fig. 5. H deviations for HER at 2001 (solid line) and 1996 (dashed line). A 10 days moving average was applied to improve the visualization.

100 and 270, and maximums near DOYs 190 and 365. This behaviour is due to the widely documented semiannual anomaly in the magnetic activity (Lal, 1998; Cliver et al., 2004; O’Brien, 2002; Svalgaard, 2011). The general consensus in the scientific community is that part of this phenomenon is produced by the Russell and McPherron effect: as the orientation of the dipole axis relative to the Sun-Earth line changes over the course of the year, the activity is largest during the equinoxes when the dipole is tilted along the Earth’s orbital track and the projection of the IMF to the geomagnetic field maximizes. Similarly, the activity level is at minimum during solstices when the projection of the IMF to the Earth’s field is on average at minimum (Russell and McPherron, 1973). However, a full description of the mechanism that causes this anomaly is still under discussion (Cliver et al., 2000; Azpilicueta and Brunini, 2012; Lockwood et al., 2016).

If a moving average (MA) filter, with a 30-days window centered at the DOY of interest, is applied to the deviation series, the results are smoothed series in which the periodicities lower than 30 days have been almost eliminated. Then subtracting the smoothed series from the deviations result in series like the two shown in Fig. 6. These final sequences will be referred to as $H27$.

Fig. 6 only shows two years but the results are similar for the rest.

Summarizing, the methodology consisted of: (i) compute: deviations = $H - \text{linear fit}(H)$ for each year of data. The results of this step is illustrated by the curves of Fig. 5; (ii) for the resulting series calculate $H27 = \text{deviations} - \text{MA}(\text{deviations}, 30)$. The window size of 30 days was chosen because it gave an optimal visualization of the signal focus of this work. Nevertheless, occasionally an extra 10-days window MA filter was applied only for clarity purposes in the figures.

The procedure was then extended to the data of every observatory and also to the other parameters presented in Section 2 resulting in the signals identified as: $F27$ for the $F10.7$, $Mg27$ for the $Mg II$, $V27$ for the ionospheric $vTEC$ and $SW27$ for the solar wind speed. The individual characteristics of $F27$, $Mg27$, $V27$, and $SW27$ as well as $H27$ will be discussed in Section 5.

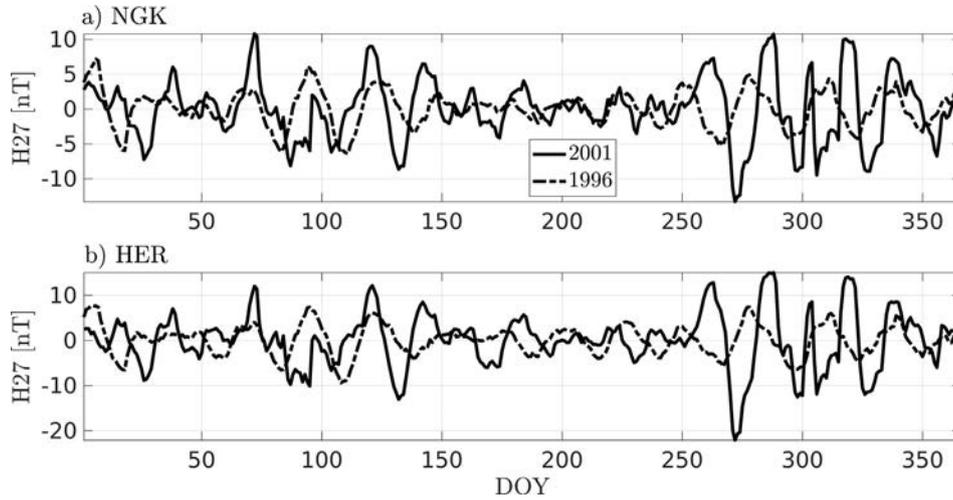


Fig. 6. 27-day signal (H27) for two different years. 1996 (dashed line) a low solar activity year and 2001 (solid line) a high solar activity year. The data of graphic (a) correspond to NGK station, located in the Northern Hemisphere and of graphic (b) to the HER station, located in the Southern Hemisphere.

4. Auto-correlation of the signals

With the aim of confirming the existence of the 27-day signal in all of the analyzed parameters, an auto-correlation analysis was performed. For a quasi-periodic sequence like the ones obtained in the previous Section, this analysis offers a tool to measure the similarity of consecutive cycles.

To perform the correlation studies presented in this Section and in Section 6, a criterion based on a Student’s test (or “t-test”) on the correlation coefficient r was adopted to establish whether two series are correlated or not, following Rodgers and Nicwander (1988), that can be stated as: the hypothesis of null correlation ($r = 0$) is rejected when r satisfies:

$$|r| > \frac{t}{\sqrt{N - 2 + t^2}} ; \tag{1}$$

where N is the length of the shorter sequence in days, and t is the quantile of a Student’s distribution (t-distribution) with $N - 2$ degrees of freedom and a significance level of 1%. If the hypothesis cannot be rejected, r is statistically equivalent to zero and the sequences are considered to be not correlated.

A final consideration for the correlation studies was to fill the data gaps with 0 values in order to get a fixed length of a year of 366 values for every year without altering the final results.

Fig. 7 shows the resulting curves (black lines) of computing the auto-correlation to the H27 signal of all the observatories as a function of the time delay. The gray-band in the figure represents the region inside which r should be considered as statistically equivalent to 0 (non-rejecting region), according to the criterion detailed in the previous paragraph. The limits of the region (critical values

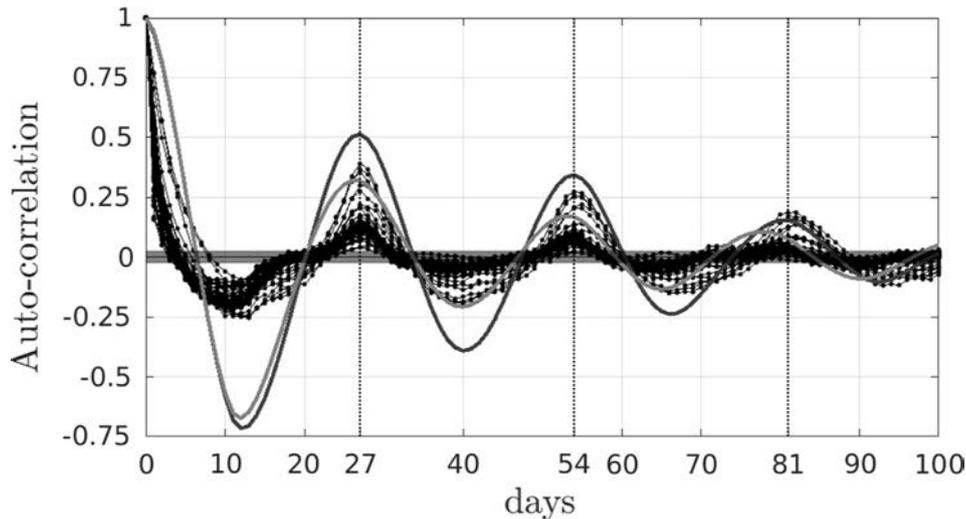


Fig. 7. Auto-correlation of H27 for all the observatories listed at Table 1 for delays between 0 to 100 days. The auto-correlation for the curves calculated in Section 5.2 are also shown: the polar curve (dark gray) and the non-polar curve (light gray). A gray band showing the region of statistical zero correlation was added.

of the test) are at y -values of ± 0.027 , obtained with Eq. (1) with $N = 7593$ days (almost 20 years), corresponding to the length of the non-zero values of the shortest H27 series. Taken the shortest series (i.e. the wider band) as the reference is enough for the rest of the series since for larger series the rejecting band would be narrow.

The analysis of Fig. 7 indicates that correlation exists (i.e. the correlation coefficients r are statistically different from 0 with a significance level of 1%) along wide ranges of the lag (x -axis). The maximum value at lag 0 is followed by a pattern that starts with a minimum (maximum anti-correlation) at approximately $T_{SYN}/2$ ($T_{SYN} = 27.27$, approximately the synodic period value), and a second maximum at lag $1T_{SYN}$. After this value, the pattern is repeated with decreasing amplitude and maximums at $\sim 2T_{SYN}$ and $\sim 3T_{SYN}$. This behaviour is typical of quasi-periodic signals with period $\sim T_{SYN}$ and like the Figure shows, is present in the auto-correlation of all the observatories.

One interesting aspect is that the observatories that had larger correlation values at $1T_{SYN}$ were verified as polar observatories according to the classification that it will be presented in Section 5. Moreover, this classification allows to compute two averaged curves, both being based on only the daily mean values of the polar and non-polar observatories, respectively (see Section 5.2). Fig. 7 also shows the auto-correlation curves of these two averaged curves. The polar curve (dark gray) and the non-polar curve (light gray) present the same characteristics: the polar curve reaches a higher value at $1T_{SYN}$. The minimum/maximum patterns in these curves are more evident since they result from averages that attenuate high frequency noise.

The results of applying the auto-correlation process to SW27, V27, Mg27 and F27 are shown in Fig. 8 for delays between 0 to 100 days. The maximum near lag 27 is present in all of them and repeats at $\sim 2T_{SYN}$ and $\sim 3T_{SYN}$.

Table 2 contains the Critical Values for Correlation (CVC) given by Eq. (1), the series length N and the correlation value at lag 27 for each signal shown in Fig. 7. Also, the parameters utilized for the H27 signals were added. It

Table 2

Critical values for correlation (CVC) calculated applying a t-test to the signals F27, SW27, Mg27 and V27 with a 1% significant level, correlation values at lag 27 (delay with the maximum value of correlation) and the N value for each series. The H27 CVC was calculated with the shortest H27 series and the correlation value corresponds to the H27 signal with the lowest auto-correlation value at lag 27. Note that it exceeds the CVC.

27-day signal	(\pm) critical value for correlation	correlation value at lag 27	N [days]
F27	0.015	0.37	23,059
SW27	0.018	0.4	16,677
Mg27	0.024	0.58	9236
H27	0.027	0.04	7573
V27	0.043	0.08	2927

can be observed that the auto-correlation at lag 27 always exceeds the CVC.

Finally, the results of this Section confirmed the existence of the 27-day signal in all of the parameters analyzed in this work.

5. Characteristics of the signals

5.1. Modulations and latitudinal dependence

Although the variety of data that were used in this work represent complete different physical processes, the 27-day signals obtained contain characteristics that are common to all of them. The first well pronounced feature is an 11-year amplitude modulation of the 27-day signal, associated to the radiative solar cycle. For F27 (Mg27 exhibits the same characteristics) this feature can be seen in Fig. 9, where F27 for the year 2000 (high solar activity) and for 1995 (low solar activity) are depicted. A similar behaviour is observed in H27 as is shown in Fig. 6, with the results obtained for NGK station (Northern Hemisphere) and HER station (Southern Hemisphere) for a high solar activity year (2001) and a low activity one (1996). In the analysis of Section 5.2 the existence of a 11-year modulation becomes clear for every year and every signal.

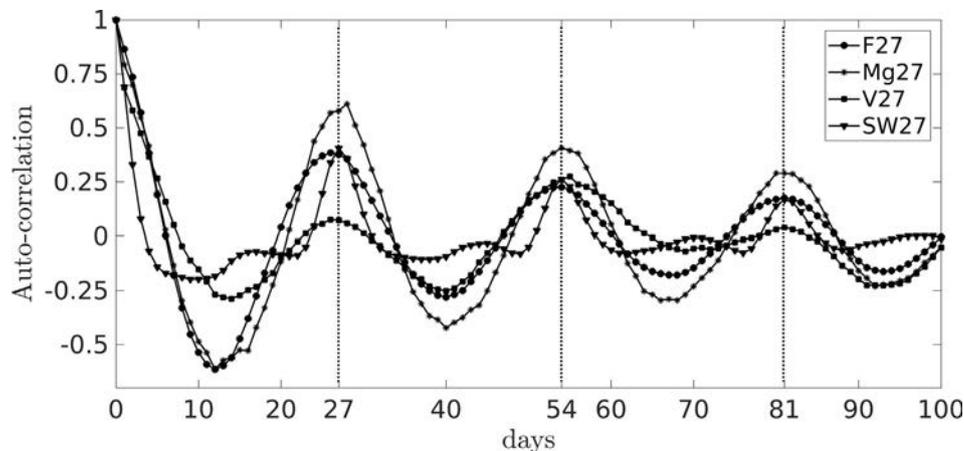


Fig. 8. Auto-correlation of SW27, V27, Mg27 and F27 for delays between 0 to 100 days.

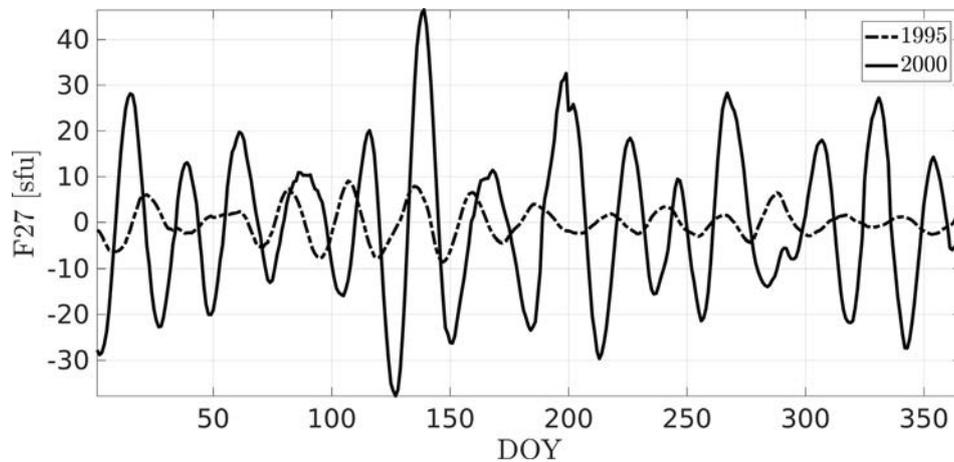


Fig. 9. F27 for a year of low (1995 in dashed line) and high (2000 in solid line) solar activity level. Both curves show a strong solar cycle modulation of their amplitude.

The second and most remarkable characteristic of the curves is the presence of another modulation with a semi-annual pattern. The maximum amplitudes approximately occur during the equinoxes and the minimums are found at solstices. Fig. 10 shows H27 for all the observatories for the year 1994 (a low solar activity year) and two curves for the averages of the observatories located in the Southern Hemisphere (dark gray) and Northern Hemisphere (light gray). In this Figure, the semiannual modulation is clearly seen for all the curves. Fig. 6 and Fig. 10 present the semiannual modulation of the amplitude for both, years of high and low solar activity.

Another characteristic that can be inferred from these two figures is that the behaviour of the signal in both hemispheres is very similar. There is not a phase or amplitude dependence of the Hemisphere.

Fig. 10 also reflects that H27 has a global behaviour in the sense that the 27-day periodicity are approximately synchronized along the year at all the observatories.

The amplitude of the signal shows dependence on the geomagnetic latitude of the observatory, based on an analysis performed to the standard deviation of the whole sequence for each observatory. Since H27 shows on an average values close to zero, then the global standard deviation must be proportional to the H27 mean amplitude. Fig. 11 shows the standard deviation for each observatory plotted against its geomagnetic latitude. The standard deviation of H27 within the latitudinal band between -60° and 60° increases almost linearly and symmetrically toward the equator in both hemispheres. This behaviour changes considerably outside this band with the standard deviations increasing significantly in the region delimited by the so called auroral ovals, approximately at $\pm(55^\circ, 85^\circ)$ geomagnetic latitudes. These latitudes encompass a region known for their strong geomagnetic response to the general plasma flow pattern in the Magnetosphere-Ionosphere system (Lyons and Williams, 1984). In the ionosphere, the large-scale convection pattern produces anti Sun-ward flow

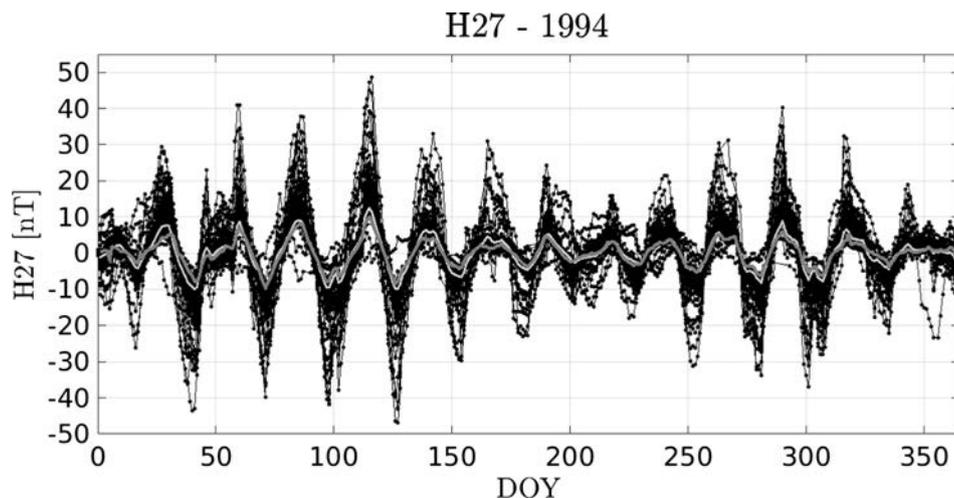


Fig. 10. H27 for all the stations of Table 1 for the year 1994. Two averaged curves were added: One considering the signal of the observatories in the Northern Hemisphere (light gray) and the other considering the signal of the observatories in the Southern Hemisphere (dark gray)

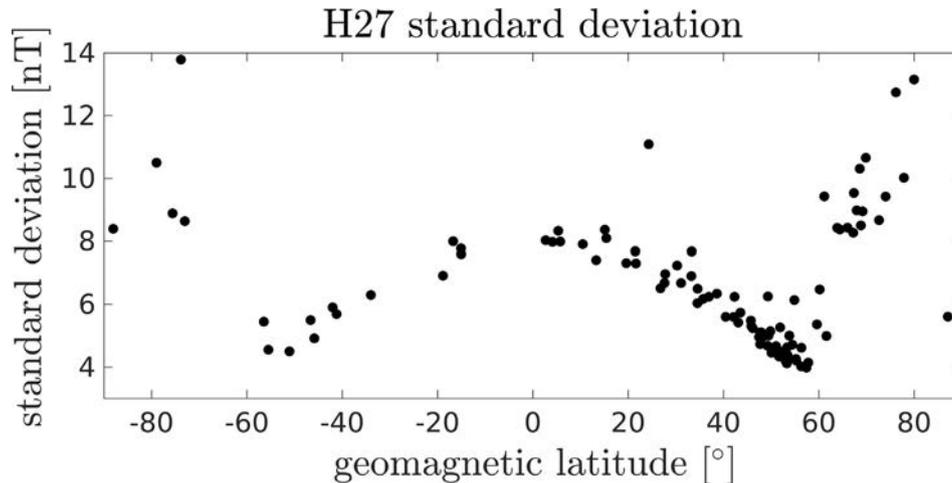


Fig. 11. Standard deviation of H27 for the complete series of all the stations of Table 1 as a function of their geomagnetic latitude.

across the polar cap and Sun-ward plasma flow in the auroral region (Heelis et al., 1982).

The standard deviation then drops in the Northern Hemisphere at approximately 80° of geomagnetic latitude and in the Southern Hemisphere at -75° . This could be associated with the lesser number of observatories in the Southern Hemisphere or with the calculation of the geomagnetic latitude itself since the Earth's magnetic field departs more from that of a dipole in the Southern Hemisphere than in the Northern Hemisphere. Nevertheless, the number of stations with latitudes greater (smaller) than 80° (-80°) is not enough to provide a strong conclusion about this idea.

In order to explore if this latitudinal dependence influences other results, the observatories situated north of 60° or south of -60° will be referred to as “polar observatories”, and the remaining “non-polar” observatories. This classification will be useful in the following Sections.

5.2. Long term behaviour of the amplitude variations

In Section 5.1, it was shown that the H27 series contain long term variations, with increasing (decreasing) amplitudes during years of high (low) solar activity. This long term behaviour was further investigated and the results will be described in this Section. Specifically the focus was on the 11-year and (the less studied) 22-year cycles in magnetic activity.

With the purpose of analyzing the effects on polar and non-polar observatories independently, two averaged curves were calculated. Each curve was obtained by computing a daily mean value combining the H27 series of the polar (non-polar) observatories. Then, a moving variance was calculated to both curves, using a 3-year centered window that enabled to explore how the amplitude varies over the years reflecting long lasting characteristics.

Fig. 12 shows the results for the polar (gray), non-polar (line with circles), SW27 (dotted line) and the F27 (black)

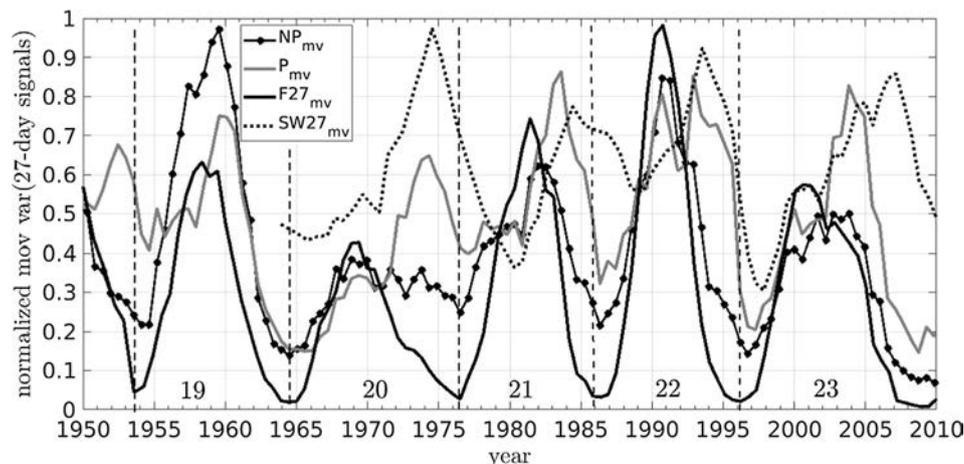


Fig. 12. Moving variance with a 3 years centered window for the H27 curve resulted from averaging the signal from polar (dark gray) and non-polar (light gray) observatories. Also shown are the moving variances for F27 (solid black) and SW27 (dashed black). All the curves are normalized by their maximum value.

curves normalized by their maximum value between 1950 and 2010.

The first characteristic that can be confirmed is the presence of an 11-year modulation in all the signals. For the F27 moving variance ($F27_{mv}$) the minimums in the graphic coincide approximately with the yearly averaged values of the sunspot numbers (SSN) that is frequently used to separate between solar cycles. In this work, the minimums of $F27_{mv}$ were identified to separate between cycles (vertical dashed line in Fig. 12) and the cycle number was included (19 to 23). The amplitude of $F27_{mv}$ is effectively modulated by the 11-year solar cycle reaching maximum values on high solar activity years and minimums on low solar activity years.

In the magnetic activity the 11-year modulation for the moving variance of the polar (P_{mv}) and non-polar (NP_{mv}) curve are quite different. These differences can be studied comparing the location of the maximums between the magnetic curves and the $F27_{mv}$ curve. For NP_{mv} the maximums are approximately synchronized with the maximums of $F27_{mv}$ in all the cycles but for P_{mv} , the maximums appear clearly delayed to the declining phase of the solar cycle. Cycle 20 shows this behaviour very pronounced, as well as a double peak structure in cycle 22. The minimums instead, do not show large differences in the 3 curves mentioned.

An interesting feature is that the 11-year modulation observed in P_{mv} differs from the one in NP_{mv} . The polar observatories seems to follow the variations in the solar wind properties more directly than the non-polar observatories. The moving variance of Mg27 and V27 are not shown because they present analogous characteristics as $F27_{mv}$.

The other long term variation analyzed was the 22-year variation. Many authors have studied the 27-day variation because it provides evidence of and information on the presence of a Hale or a double solar cycle (DSC). The 22-year variation in the polarity of leading spots on the Sun was first discovered by Hale et al. (1919) and related it to the reversal of the large-scale field of the Sun (Babcock, 1961). Thus the fundamental cycle on the Sun is the 22-year magnetic or Hale cycle.

The main characteristic of the 22-year variation in the magnetic activity is the asymmetry in the values on the rising and declining phase of consecutive 11-year cycles. According to this theory, the even cycles have higher amplitudes in the declining phase and the odd in the rising phase. $F27_{mv}$ is utilized again to define the rising and declining phases that serves to test the theory.

Fig. 12 does not show any clear characteristic that could be related to the 22-year cycle. P_{mv} shows systematically higher values in the declining phase than in the rising phase for the 5 cycles represented, but the pattern (even-high, odd-low) is not present. There have been some controversy at this respect, since as Cliver et al. (1996) pointed out, some comprehensive investigations of the periodic variations in geomagnetic activity failed to obtain evidences of a 22-year periodicity like Clúa de Gonzalez et al. (1993).

6. Cross-correlation as a way to infer the origin of the signals

Interesting results appear when the cross-correlation is applied to pairs of signals. The following paragraphs present and describe these results.

6.1. Cross-correlation between F27-V27 and Mg27-V27

First, the correlations F27-V27 and Mg27-V27 were analyzed. For the years with V27 data (the shorter data series), a correlation coefficient per year was calculated for both pairs of signals. The F27-V27 correlation gave a mean value of 0.4 ± 0.09 , while the Mg27-V27 correlation gave 0.43 ± 0.04 . The correlation coefficients for all the years were similar. As a result, the standard deviations are low in both cases. The processing technique did not filter periodicities under 30 days, then the 27-day signals were disturbed by signals with higher frequencies preventing to obtain higher correlation coefficient values in most cases.

An interesting aspect appears when the time-delay (cross-correlation lag) that maximizes the absolute value of the cross-correlation is analyzed. Since the signals are approximately periodic the cross-correlation would be approximately periodic too and the absolute value would take into account the direct and opposite dependence between the variables ($vTEC$ and F10.7 or Mg II). The F27-V27 and Mg27-V27 cross-correlations presented a maximum at 1 day and their curves for the $(-9, 11)$ delays range are shown in Fig. 13. The calculated CVC was ± 0.043 .

The classic theory of ionization and recombination processes predicts that the reaction of the atmosphere to the variations of the EUV flux could have a delay of 1 h and is determined mainly by the time constants involved in the theory (Afraimovich et al., 2006). The differences with the results obtained in this work (1 day) could be explained considering the processes in the atmosphere itself since the ionization changes not only as a result of variations in the EUV flux. One example is the ionization changes due the atmospheric winds which are generated by solar heating in the diurnal side of the Earth. An increase in the solar radiation flux, ionizes the ionosphere but also heats the thermosphere resulting in a change of velocity and direction of the neutral wind.

Some authors have found dissimilar results when analyzing the delays of the 27-day variation e.g. Afraimovich et al. (2006) and Hocke (2008). In the first case they found a delay ranging between 1.5 to 2.5 days using ionospheric global electron content and in the later one a delay between 0 and 3.5 h utilizing the Mg II index and global TEC values is obtained. The results of this work are comparable to those of the previously mentioned authors.

F27 and Mg27 measures the 27-day variation of the solar radiation in the ionizing region of the spectrum. The result of a 1 day delay supports what is already known: V27 has a radiative origin and then it is directly related to radiation level changes.

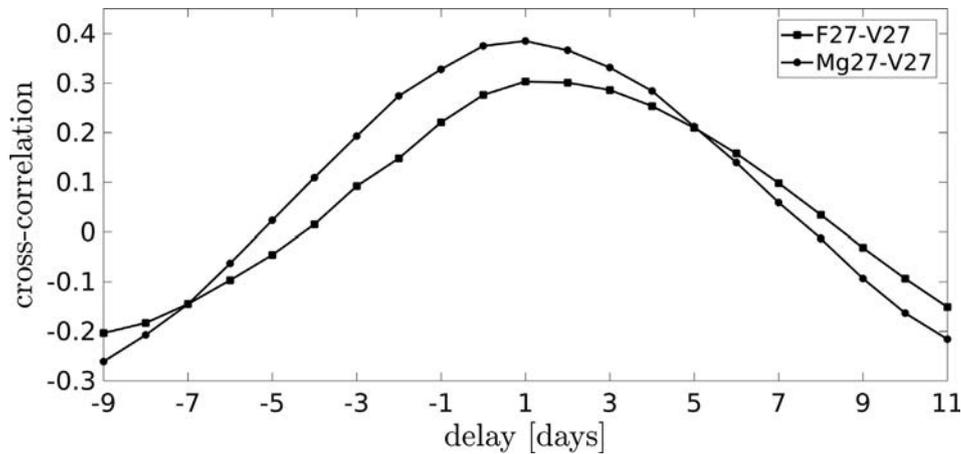


Fig. 13. Mg27-V27 and F27-V27 cross-correlations for lags between -9 and 11 days. The CVC with a significance level of 1% was ± 0.043 .

6.2. Cross-correlation between F27-H27

The origin of H27 is not as direct as V27, since temporal variations in the solar radiation as well as the geoeffective parameters of the solar wind can generate temporal variations in the terrestrial magnetic activity. The first possible hypothesis is that H27 has a radiative origin, like it happens for example with the diurnal magnetic variation (commonly referred as S_q or S_r fields). This is one of the most regular variations in the magnetic activity and is originated by the dynamo currents in the ionospheric E-layer. In this region, the gyrofrequency is smaller than the collision frequency for ions but larger for electrons. Therefore the ions are carried along with the wind and the electrons move nearly across it and more slowly (see (Hargreaves, 1992), Ch. 6). Their relative movement forms an electric current system that modify the magnetic field measured on the surface of the Earth.

The second possible hypothesis for the origin of H27 is the entrance of solar wind particles into the magnetosphere. The magnetic field response measured on the terrestrial surface due to changes in the solar wind conditions has been widely studied specially related to magnetic storms and the solar structures that could generate them like coronal mass ejections (Gonzalez et al., 1994; Clúa de Gonzalez et al., 1993). The general idea of the physical process involved states that if the southward component of the IMF past the Earth for a sufficiently long interval of time, magnetic reconnection allows the increase in number and energy of positive ions and electrons drifting in the outer radiation belt enhancing the ring current around the earth and producing a decrease in the surface magnetic field. When the reconnection ends, the energy is dissipated and the magnetic field recovers previous values. The recursive pattern of H27 examined in the previous Sections could be originated by a similar physical principle but with the following difference: the source of the 27-day magnetic variation should be in structures that lead to a permanent interaction between the solar wind and the magnetosphere and not in transient events. The study of the 27-day signal

as a continuous permanent magnetic perturbation is in fact different from the studies mentioned before and is the focus of this work. In this sense, the changes in the geometric configuration between the solar wind and the magnetosphere (more precisely the relative configuration of their magnetic dipoles) arising in a solar rotation should play the most important role.

Studying the cross-correlation between H27 and F27 helped to understand the problem and as will be detailed in the next paragraphs provided some evidences in favor of the second hypothesis.

Fig. 14 shows the result of the F27-H27 cross-correlations curves for all the observatories. In this case it can be seen that when F27 increases H27 responds with a decrease (in fact an increase of the magnitude but with the opposite sign, i.e. in phase opposition). The lags that maximized the anti-correlations were between 3 and 5 days for 87 observatories, with 4 days the most frequent with 60 observatories and the remaining 16 were inconsistently outside this interval. From Table 1, it can be verified that these 16 stations are mostly located in the polar regions. Only two of these, the equatorial observatory TRD, in India at $(0.55, 139.94)$ and the mid-latitude TEO, in Mexico at $(-28.55, 28.22)$ are not polar. The CVC (see Section 4) for this Figure was ± 0.027 exceeded in all cases at the delays analyzed.

The obtained average delay of 4 days contradicts the first hypothesis of a radiative origin for H27. If the radiation would be the cause of H27, the cross-correlation should have a maximum or minimum at a lag of 0 or 1 day, since the radiative energy only needs some minutes to travel from the Sun to the Earth. Analyzing the second hypothesis of a possible solar wind origin for H27 is valid to associate the 4-day lag to the time needed by the particles (and any variation in its density and velocity) that compose the solar wind to cover the Sun-Earth distance (1AU). Following this reasoning an experimental average velocity can be computed as: $1\text{AU}/4\text{days} = 432.86 \text{ km s}^{-1}$. This value agrees with the mean value calculated using the direct measurements of satellite missions described in Section 2.4 of $\bar{v}_{sw} = 437.88 \text{ km s}^{-1}$.

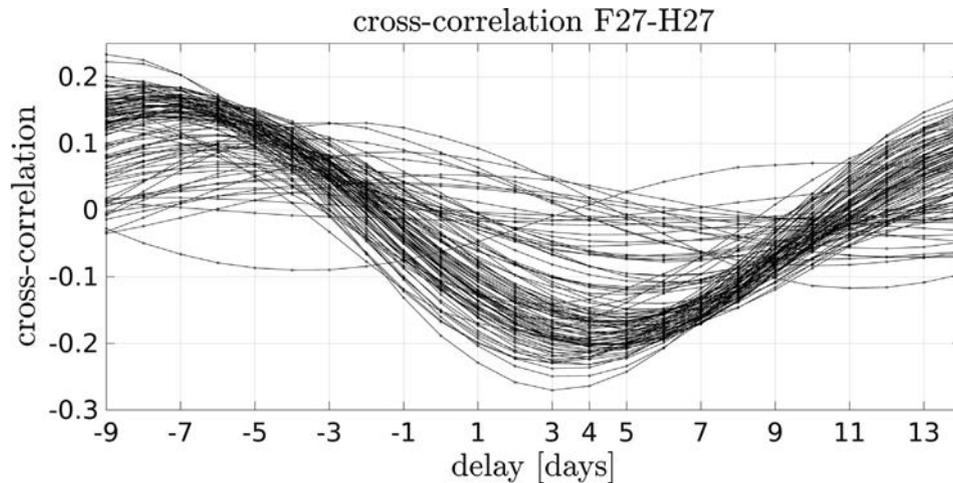


Fig. 14. F27-H27 normalized cross-correlations for lags between -9 and 14 days for all the observatories. The CVC was ± 0.027 .

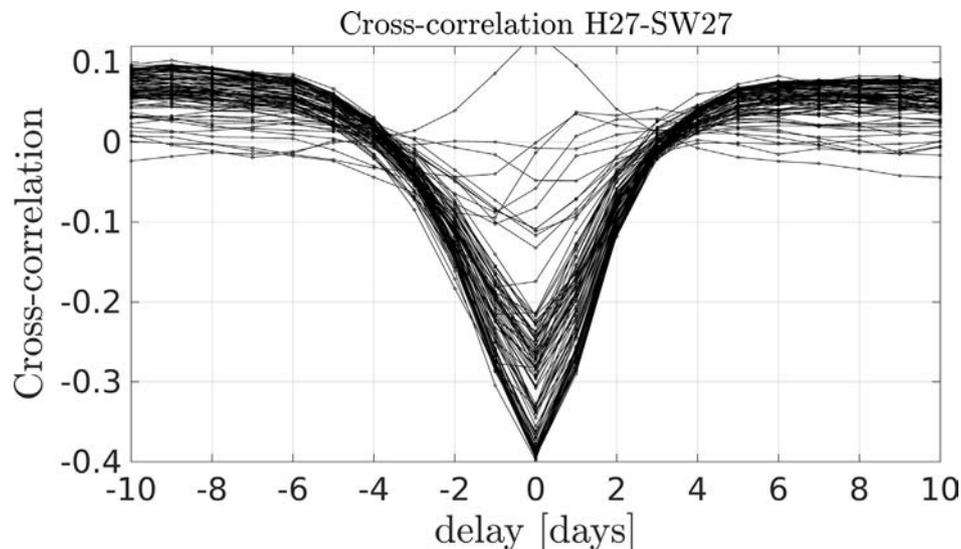


Fig. 15. H27-SW27 normalized cross-correlations for lags between -10 and 10 days for all the observatories. The critical correlation value was ± 0.027 .

The cross-correlation between SW27 and H27 was also helpful to analyze the second hypothesis. Fig. 15 shows the H27-SW27 cross-correlation for all the stations. A clear anti-correlation at lag 0 is clearly seen for most observatories, showing that both signals are synchronized. In this case, for only 9 observatories the anti-correlation maximums were at lags different than 0. The CVC was the same as in Fig. 14.

The results described in the previous paragraphs provide evidences in favor of a solar wind origin hypothesis for H27. The origin of it seems to be in a periodical process that transfers energy from the solar wind into the magnetosphere.

7. Conclusions

The 27-day recurrence is a manifestation of the longitudinal asymmetry in the Sun. This asymmetry is generated

by certain solar structures, large as the coronal holes in the solar corona but also by smaller irregularities, that can exhibit a 27-day periodicity when viewed from the Earth. The variety of 27-day signals that this asymmetry generates have been classified by their origin as it was detailed in Section 1. In this work a cross-correlation analysis was performed to study the possible origin of H27 considering the most plausible hypotheses mentioned: a radiative or a solar-wind-magnetosphere interaction origin. The method consisted in utilizing F27 and Mg27 as indicators of the 27-day variation in the radiative activity of the Sun and then cross-correlate them with the other 27-day signals to analyze the delays between every pair of signals.

The results obtained for the F27-V27 and Mg27-V27 cross-correlations gave maximum correlation for 1 day of delay, were consistent with those of other authors and enabled to validate the technique. But for F27-H27 the result was a delay of 4 days in most observatories thus

the hypothesis of a radiative origin of H27 was discarded. Associating the 4-day lag to the time needed by the solar wind particles to travel from the Sun to the Earth (1AU), this result gives an average velocity of: $1 \text{ AU}/4 \text{ days} = 432.86 \text{ km s}^{-1}$. The estimated speed can be considered as equivalent to the mean solar wind speed of $\bar{v}_{sw} = 437.88 \text{ km s}^{-1}$ estimated with direct measurements in Section 2.4 supporting the second hypothesis proposed. Moreover, the 0 days delay obtained from the cross-correlation between H27-SW27 showed that these variables are synchronized.

In addition to the previous results, the study of the 27-day variation in a large number of observatories led not only to describe H27 in time but in space, considering the geomagnetic latitude of the observatories. Two groups of them were identified (inside the $(-60^\circ, 60^\circ)$ latitudinal band and outside it), taking into account an overall amplitude value of the signals represented in Fig. 11. This information is often lost when specific magnetic indices are employed to study this periodicity, e.g. Ap, am or aa (Apostolov et al., 2004; Cliver et al., 1996; Singh and Badruddin, 2014) since they result from the averaging combinations made in several observatories producing single global values.

These two groups of H27 signals, presented different behaviours in most of the analyses performed. In addition to the amplitude differences mentioned (see Section 5.1 for details), the polar curves exhibited a higher auto-correlation values at $\sim 1T_{SYN}$ (Fig. 7), a different long term behaviour (Section 5.2) and different delays with respect to F27 (Section 6). A first hypothesis to explain these differences will be investigated in a future work, and involves the possibility that the H component would not be the adequate quantity to study the 27-day variation at the proximity of the geomagnetic poles.

Finally, in the temporal evolution analysis of the different signals, two main amplitude modulations were found. An 11-year modulation that was present in the 27-day signals of every parameter and on an annual scale a semiannual modulation in H27. Furthermore, an interesting aspect of the temporal analysis is that the highly recurrent characteristic of H27 analyzed in long temporal sequences indicates that the geometric configuration changes of the Sun's magnetic field and the Earth's magnetic field during a rotation could be a more important factor than any temporary solar wind structure in generating the 27-day variation.

Acknowledgments

The authors of this paper thank the following institutions for publicly distributing the data used in this work: World Data Center for Geomagnetism (Edinburgh), Goddard Space Flight Center, National Oceanic and Atmosphere Administration, Jet Propulsion Laboratory. Also, the authors thank the anonymous reviewers for their valuable comments about this work.

References

- Aframovich, E.L., Astafyeva, E.I., Zhivetiev, I.V., 2006. Solar activity and global electron content. *Dokl. Earth Sci.* 409, 921–924. <https://doi.org/10.1134/s1028334x06060195>.
- Apostolov, E.M., Altadill, D., Todorova, M., 2004. The 22-year cycle in the geomagnetic 27-day recurrences reflecting on the F2-layer ionization. *Ann. Geophys.* 22, 1171–1176. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1171-2004>.
- Azpilicueta, F., Brunini, C., 2012. A different interpretation of the annual and semiannual anomalies on the magnetic activity over the Earth. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 117 <https://doi.org/10.1029/2012ja017893>.
- Babcock, H.W., 1961. The topology of the sun's magnetic field and the 22-yr Cycle. *Astrophys. J.* 133, 572. <https://doi.org/10.1086/147060>.
- Beck, J.G., 2000. A comparison of differential rotation measurements. *Sol. Phys.* 191, 47–70. <https://doi.org/10.1023/a:1005226402796>.
- Burlaga, L.F., Szabo, A., 1999. Fast and slow flows in the solar wind near the ecliptic at 1 AU? In: *Coronal Holes and Solar Wind Acceleration*. Springer Netherlands, pp. 137–140. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-015-9167-6_12.
- Cliver, E.W., Boriakoff, V., Bounar, K.H., 1996. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 101, 27091–27109. <https://doi.org/10.1029/96ja02037>.
- Cliver, E.W., Kamide, Y., Ling, A.G., 2000. Mountains versus valleys: semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 105, 2413–2424. <https://doi.org/10.1029/1999ja900439>.
- Cliver, E.W., Svalgaard, L., Ling, A.G., 2004. Origins of the semiannual variation of geomagnetic activity in 1954 and 1996. *Ann. Geophys.* 22, 93–100. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-93-2004>.
- Clúa de Gonzalez, A.L., Gonzalez, W.D., Dutra, S.L.G., Tsurutani, B.T., 1993. Periodic variation in the geomagnetic activity: a study based on the Ap index. *J. Geophys. Res.* 98, 9215. <https://doi.org/10.1029/92ja02200>.
- Fraser-Smith, A.C., 1972. Spectrum of the geomagnetic activity index Ap. *J. Geophys. Res.* 77, 4209–4220. <https://doi.org/10.1029/ja077i022p04209>.
- Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T., Vasyliunas, V.M., 1994. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 99, 5771. <https://doi.org/10.1029/93ja02867>.
- Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B., Joy, A.H., 1919. The magnetic polarity of sun-spots. *Astrophys. J.* 49, 153. <https://doi.org/10.1086/142452>.
- Hargreaves, J.K., 1992. *The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace – the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Heelis, R.A., Lowell, J.K., Spiro, R.W., 1982. A model of the high-latitude ionospheric convection pattern. *J. Geophys. Res.* 87, 6339. <https://doi.org/10.1029/ja087ia08p06339>.
- Hocke, K., 2008. Oscillations of global mean TEC. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 113 <https://doi.org/10.1029/2007ja012798>.
- Jee, G., 2004. Analysis of TEC data from the TOPEX/Poseidon mission. *J. Geophys. Res.*, 109 <https://doi.org/10.1029/2003ja010058>.
- Lal, C., 1998. Solar wind and equinoctial maxima in geophysical phenomena. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 60, 1017–1024. [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(98\)00046-7](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(98)00046-7).
- Lockwood, M., Owens, M.J., Barnard, L.A., Bentley, S., Scott, C.J., Watt, C.E., 2016. On the origins and timescales of geoeffective IMF. *Space Weather* 14, 406–432. <https://doi.org/10.1002/2016sw001375>.
- Lyons, L.R., Williams, D.J., 1984. *Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics*. Springer, Netherlands. doi:<https://doi.org/10.1007/978-94-017-2819-5>.
- Min, K., Park, J., Kim, H., Kim, V., Kil, H., Lee, J., Rentz, S., Lühr, H., Paxton, L., 2009. The 27-day modulation of the low-latitude ionosphere during a solar maximum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 114 <https://doi.org/10.1029/2008ja013881>.

- O'Brien, T.P., 2002. Seasonal and diurnal variation of Dst dynamics. *J. Geophys. Res.*, 107 <https://doi.org/10.1029/2002ja009435>.
- Prössl, G.W., 2004. *Physics of the Earth's Space Environment*. Springer Berlin, Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-97123-5>.
- Reuveni, Y., Price, C., 2009. A new approach for monitoring the 27-day solar rotation using VLF radio signals on the earth's surface. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 114, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2009ja014364>.
- Rodgers, J.L., Nicewander, W.A., 1988. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *Am. Stat.* 42, 59. <https://doi.org/10.2307/2685263>.
- Russell, C.T., McPherron, R.L., 1973. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 78, 92–108. <https://doi.org/10.1029/ja078i001p00092>.
- Sargent, H., 1986. The 27-day recurrence index. *Sol. Wind-Magnetosp. Coupl.* 77, 143–148. https://doi.org/10.1007/978-90-277-2303-1_11.
- Schreiber, H., 1998. On the periodic variations of geomagnetic activity indices Ap and ap. *Ann. Geophys.* 16, 510–517. <https://doi.org/10.1007/s00585-998-0510-2>.
- Shapiro, R., Ward, F., 1966. Three peaks near 27 days in a high-resolution spectrum of the international magnetic character figure, Ci. *J. Geophys. Res.* 71, 2385–2388. <https://doi.org/10.1029/jz071i009p02385>.
- Singh, Y., Badruddin, 2014. Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis. *Planet. Space Sci.* 96, 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.03.019>.
- Štréšćák, J., 1998. Spectrum of geomagnetic activity in the period range 5–60 days: possible lunar influences. *Ann. Geophys.* 16, 804–811. <https://doi.org/10.1007/s00585-998-0804-4>.
- Sugiura, M., Kertz, W., Price, A., Stone, D., 1964. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. *Annals of the international geophysical year*. Pergamon Press.
- Svalgaard, L., 2011. Geomagnetic semiannual variation is not overestimated and is not an artifact of systematic solar hemispheric asymmetry. *Geophys. Res. Lett.*, 38 <https://doi.org/10.1029/2011gl048616>.
- Tsurutani, B.T., Gonzalez, W.D., Gonzalez, A.L.C., Guarnieri, F.L., Gopalswamy, N., Grande, M., Kamide, Y., Kasahara, Y., Lu, G., Mann, I., McPherron, R., Soraas, F., Vasyliunas, V., 2006. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: a review. *J. Geophys. Res.*, 111 <https://doi.org/10.1029/2005ja011273>.
- Vasyliunas, V.M., 1975. Theoretical models of magnetic field line merging. *Rev. Geophys.* 13, 303. <https://doi.org/10.1029/rg013i001p00303>.
- Viereck, R., Puga, L., McMullin, D., Judge, D., Weber, M., Tobiska, W. K., 2001. The Mg II index: a proxy for solar EUV. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1343–1346. <https://doi.org/10.1029/2000gl012551>.
- Ward, F.W., 1960. The variance (power) spectra of Ci, Kp, and Ap. *J. Geophys. Res.* 65, 2359–2373. <https://doi.org/10.1029/jz065i008p02359>.

VARIACIÓN DE ~27 DÍAS EN LA ACTIVIDAD MAGNÉTICA TERRESTRE: CARACTERÍSTICAS GLOBALES Y UN NUEVO ENFOQUE BASADO EN EL ORIGEN DE LAS SEÑALES

27-DAY VARIATION IN TERRESTRIAL MAGNETIC ACTIVITY: GLOBAL CHARACTERISTICS AND A NEW APPROACH BASED ON THE ORIGIN OF THE SIGNALS

Facundo Leandro Poblet¹, Francisco Azpilicueta¹

1 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata, Argentina.

Email: fpoblet@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El campo magnético terrestre posee un amplio rango de variaciones temporales. En primera instancia se pueden clasificar según si provienen del campo magnético de origen interno como las variaciones seculares o las corrientes inducidas en la corteza, o si provienen de origen externo. En estas últimas, el principal responsable es el Sol que provoca desde las variaciones regulares como la variación diurna hasta algunas irregulares que dan origen por ejemplo a las tormentas magnéticas. El proceso físico disparador que las ocasiona no es el mismo en todos los casos. En este trabajo se investiga la variación de aproximadamente 27 días de periodicidad en la componente H del campo magnético terrestre asociada a la rotación solar. El rasgo más recurrente de esta señal, obtenida tras varias etapas de procesamiento que tratan de aislar tal variación, es que presenta otras periodicidades acopladas en su amplitud: una fuerte modulación de la amplitud por el ciclo solar y una segunda modulación semi-anual. Finalmente, el análisis comparativo con otras señales de ~27 días en parámetros solares como los índices $F10.7$ y $Mg II$, y el $vTEC$ ionosférico permite establecer que el proceso físico que da origen a la señal en la actividad magnética está asociado al viento solar y no a su radiación electromagnética.

Palabras clave: viento solar, radiación solar, señal de ~27 días, cross-correlation.

ABSTRACT

The terrestrial magnetic field has a wide range of temporal variations. In a first instance they can be classified according to whether they come from the magnetic field of internal origin as the secular variation or crustal induced currents, or if they come from external sources. In the latter case, the main responsible is the Sun that causes from regular variations such as the diurnal variation to some more irregular ones for example those that produce magnetic storms. The physical process that triggers them it is not the same in all cases. In this paper, the variation of approximately 27 days of periodicity in the H component of the terrestrial magnetic field, associated to solar rotation is investigated. The most recurrent feature of this signal, obtained after various processing steps in an intend to isolate it, is the presence of other periodicities coupled to its amplitude: a strong amplitude modulation by the solar cycle and a second semiannual modulation. Finally, a comparative analysis with other ~27 days

signals in the solar parameters $F10.7$ and $Mg II$ index, and ionospheric $vTEC$ allows to establish that the physical process that gives rise to the signal in the magnetic activity is associated with the solar wind and not to its electromagnetic radiation.

Key words: solar wind, solar radiation, 27-day variation, cross-correlation.

INTRODUCCIÓN

El Sol está compuesto por un plasma gaseoso que provoca que su rotación no sea uniforme como un cuerpo sólido. Por ello, la velocidad de rotación en el ecuador solar es mayor, y decrece a medida que aumenta la latitud. Se dice que el Sol posee “rotación diferencial”, cuyo origen es objeto de estudio en la actualidad.

De acuerdo con la definición de Carrington (1863), el período de rotación del sol es de 25,3 días, que corresponde al período de rotación a una latitud heliográfica de 26° . Es comúnmente llamado el *período sidéreo* y no debe confundirse con el *período sinódico* de rotación de 27,2 días que se define como el tiempo promedio que le toma a un punto fijo en el Sol rotar a la misma posición aparente vista desde la Tierra (Beck, 2000). El período sinódico puede ser detectado en muchas variables físicas que se miden en la Tierra pero a grandes rasgos pueden ser clasificadas según su origen en señales que provienen de la entrada de partículas cargadas a la magnetosfera terrestre y señales que provienen de la radiación solar.

Para el caso cuyo origen son las partículas cargadas, la variable más importante para detectar una señal de ~ 27 días es el viento solar. En la órbita terrestre posee una densidad media de unos 4 protones cm^{-3} , una velocidad media de 400 km s^{-1} , y contiene un campo magnético interplanetario (IMF, por su acrónimo en inglés: Interplanetary Magnetic Field) de 5 nT. El proceso de reconexión magnética entre el campo magnético terrestre (CMT) y el IMF domina la actividad geomagnética. En el sistema GSM, cuando el dipolo terrestre es aproximadamente perpendicular al plano de la eclíptica, la reconexión depende principalmente de la componente sur del IMF, y es proporcional a la componente Y del campo eléctrico \vec{E} del viento solar (Vasyliunas, 1975), definido según la ec. (1):

$$\vec{E} = -\vec{v}_{sw} \times \vec{B}_{IMF} \quad (1)$$

donde \vec{v}_{sw} es la velocidad del viento solar y \vec{B}_{IMF} es el IMF. Por lo tanto, las estructuras de viento solar que tengan un IMF con la componente sur uniforme e intensa o velocidades altas serán más eficientes en la transferencia de energía al interior de la magnetosfera.

La variación de ~ 27 días en la actividad magnética ha sido estudiada por numerosos autores. Un trabajo pionero en este tema es el de Neupert y Pizzo (1974), en donde se identifica la relación entre el viento solar que generan los agujeros coronales (caracterizado por tener una velocidad relativamente alta y una densidad baja), con el aumento en la frecuencia de las tormentas magnéticas en la Tierra.

Los métodos más comunes para el análisis detallado de esta señal utilizan el espectro de potencia de los índices magnéticos (Ward, 1960; Fraser Smith, 1972) o bien métodos de correlación (Sargent, 1986). En este sentido, Schreiber (1998) investigó las variaciones periódicas en la larga serie de datos de los índices aa y Ap (Mayaud, 1980), y sugirió que la corta duración temporal de algunas estructuras longitudinales como los agujeros coronales (que pueden aparecer y desaparecer en diferentes longitudes heliográficas), hacen que el método de Fourier no sea el más adecuado para el estudio de esta señal en series muy largas. Los numerosos picos alrededor de esta periodicidad, encontrados en los espectros calculados por Clua de Gonzalez et al. (1993), permiten sustentar esta hipótesis. En los últimos años, se han implementado otras técnicas para el estudio de esta señal en la actividad magnética, como el análisis Wavelet. En el artículo de Singh y Badruddin (2014) se utiliza esta técnica y se confirma la presencia de esta señal pero también la de otras periodicidades como 5,3 años y 11 años utilizando los índices aa y SSN (Sunspot number).

Las señales de ~ 27 días cuyo origen está asociado a la radiación solar se generan porque a medida que el sol rota sobre su eje, la proyección de la Tierra sobre el disco solar es afectada por distintas fuentes de radiación (distribuidas de manera no homogénea alrededor del disco), de modo que el flujo de radiación que llega a las capas altas de la atmósfera cambia (Lean et al., 1997). Las

componentes de esta radiación que son capaces de ionizar los elementos neutros de la atmósfera son las correspondientes a las bandas UV y rayos X del espectro electromagnético y son muy importantes ya que dan lugar a la ionosfera. Existe por lo tanto, una conexión muy estrecha entre las variaciones temporales en la radiación solar y la generación y destrucción de iones en el sistema ionosfera-termosfera. Estas variaciones han sido estudiadas por diversos autores, abarcando análisis globales en donde se analizan las periodicidades encontradas en variables como el TEC y la densidad electrónica considerando a la ionosfera en su totalidad como los artículos de Afraimovich et al. (2006) y Hocke (2008), o bien análisis más locales en donde el estudio se centra en una región específica de la ionosfera como la ionosfera alta (Min et al., 2009) o la capa D, la más baja de la ionosfera (Reuveni y Price, 2009).

El estudio combinado de la periodicidad de ~27 días en los distintos parámetros del medio Sol-Tierra ha servido para investigar otras periodicidades no tan documentadas en la actividad magnética terrestre. Por ejemplo, en el artículo de Apostolov et al. (2004) se analiza la periodicidad de 22 años en la actividad magnética. Utilizan los índices A_p , $F10.7$ y la frecuencia crítica f_{oF2} para analizar la variación de las amplitudes de la señal de ~27 días a lo largo de los ciclos solares 18 al 22, y encuentran que es mayor en los ciclos pares que en los impares, lo cual es un indicador del ciclo de 22 años como proponen otros autores (Cliver et al., 1996).

Como se puede constatar, la señal de ~27 días ha sido ampliamente estudiada. Es usual que esta periodicidad se encuentre afectada por otros fenómenos que aparecen acoplados a la señal, como por ejemplo la fase del ciclo solar. Es así que el objetivo de este trabajo es estudiar esta periodicidad en la actividad magnética y ver qué otras variaciones se encuentran presentes. Para hacerlo, se utilizan como punto de partida los resultados encontrados por Azpilicueta et al. (2012), en el que identifica la presencia de una señal de ~27 días de periodicidad en la componente H del campo magnético terrestre, modulada con diversas periodicidades. En este trabajo se aplica la misma metodología en mediciones de 10 observatorios magnéticos distribuidos alrededor del globo. La elección de los observatorios resulta de un estricto proceso de filtrado de los datos que tiene por objetivo mejorar la calidad de las mediciones con las que se trabaja.

El resultado es la presencia de la señal de ~27 días cuya amplitud se encuentra modulada por el ciclo solar y por la variación semi-anual al mismo tiempo en los 10 observatorios analizados.

El mismo procedimiento es extendido a otras mediciones, que son los parámetros solares $F10.7$ y $Mg II$ y valores de TEC globales obtenidos de la misión TOPEX/Poseidon (Jee, 2004). Teniendo una señal de ~27 días en distintas variables del medio Sol-Tierra se pueden diferenciar las variaciones presentes en cada una y comparar las señales para sacar conclusiones sobre el origen de la señal en la actividad magnética. Como se verá más adelante, encontrar el desfase para el cual la señal radiativa y la señal magnética hacen máxima la correlación entre ambas permite obtener resultados al respecto. Al hacer lo mismo con las señales radiativas e ionosféricas, se puede comparar el resultado obtenido por otros autores.

La metodología utilizada no permite discernir variaciones por debajo de 1 día ya que se utilizan valores medios diarios en todos los casos. Todo el análisis se hace en el dominio temporal, por lo que difiere de la mayoría de los trabajos clásicos en este tema.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN LA ACTIVIDAD MAGNÉTICA – H27

Observatorios seleccionados

La red global INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org/index-eng.php>) agrupa una gran cantidad de observatorios magnéticos distribuidos a lo largo del globo, que contienen datos precisos y con estándares modernos de medición. Los datos de estos observatorios son públicos, y pueden encontrarse por ejemplo en la página de la "World Data centre for Geomagnetism (Edinburgh)" (WDC) <http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>. La Figura 1 muestra los valores medios diarios de la componente H medida en distintas estaciones distribuidas en el hemisferio norte y en el hemisferio sur. El comportamiento de H es distinto según el observatorio y el año. Se pueden observar saltos que no provienen de procesos naturales, sino que son consecuencia de cambios en la configuración de los magnetómetros y/o en el cálculo de la línea de base para cada observatorio. A su vez, la longitud temporal es muy variable dependiendo del observatorio. En algunos de ellos, se observa una tendencia negativa asociada a fenómenos de gran escala temporal como la variación secular.

Las características mencionadas se tuvieron en cuenta a la hora de seleccionar las 10 estaciones definitivas utilizadas en este trabajo. En primer lugar, de todos los observatorios de la WDC, se eligieron los que cumplían las siguientes condiciones:

1. Sólo los días con mediciones en las 24 hs. fueron utilizadas.
2. Sólo los años con al menos 330 días con mediciones fueron seleccionados.
3. Si hubieran saltos dentro del año, en los que los valores de un lado y del otro del salto se mantienen (reflejando que el salto no proviene de procesos naturales) el año fue descartado. Se consideró saltos en los que los valores contiguos dentro de un año tenían una diferencia mayor o igual a 70 nT.
4. Solamente los observatorios con 15 o más años, luego del filtrado anterior fueron seleccionados.

El segundo criterio de selección fue que cubrieran ambos hemisferios y que abarcaran un amplio rango de longitudes y latitudes geomagnéticas para que el resultado del procesamiento reflejase fenómenos en todo el globo. Teniendo un conjunto de estaciones con esta distribución, se seleccionaron 10 observatorios. La Tabla 1 muestra la ubicación en coordenadas geomagnéticas de los observatorios resultantes.

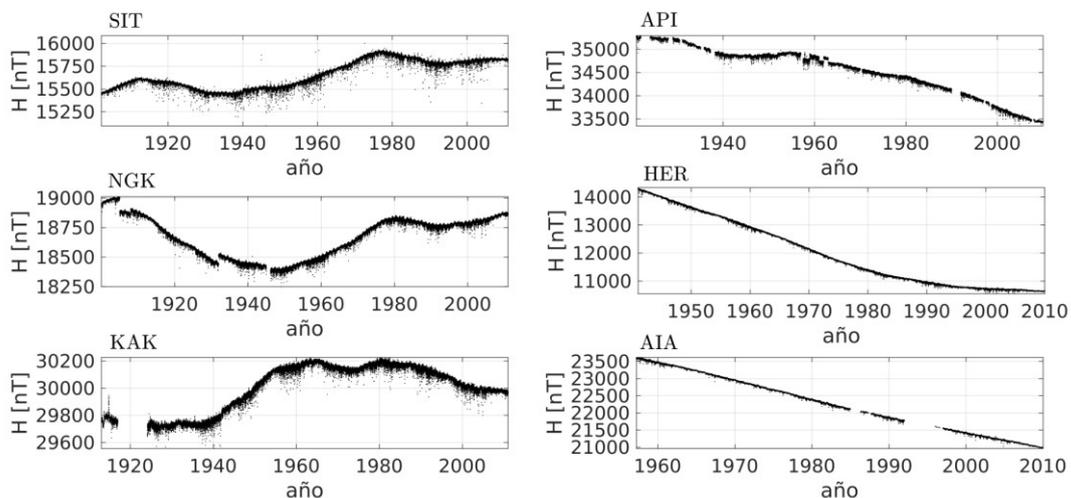


Figura 1. Componente H del campo magnético terrestre. Media diaria para 6 observatorios permanentes. 3 (Izq.) del hemisferio Norte y 3 (Der.) del hemisferio Sur.

Figure 1. Earth magnetic field H component. Medium value for 6 permanent observatories. 3 (left) in the North hemisphere and 3 (right) in the South hemisphere.

Obtención de la señal

Para evaluar periodicidades que se encuentren dentro del año, se debe quitar la tendencia secular. En la elaboración de índices magnéticos que monitorean la actividad magnética terrestre, se suelen utilizar datos de años contiguos a un año particular para quitar esta tendencia. Este es el caso del índice Dst en el que se realiza un ajuste cuadrático con los 4 años anteriores al año de interés que luego se resta a los valores de H (Sugiura, 1964). En nuestro caso, la tendencia secular fue removida considerando a cada año como individual. En primer lugar, se promediaron los 24 valores horarios de H para cada día de todos los observatorios. Luego, para cada año se ajustó una recta con todos los valores de ese año, que luego se sustrajo a los valores de H. Sustraer la tendencia de los valores medios diarios de H es análogo a aplicar un filtro pasa bajos a los datos, y el resultado es una señal que contiene períodos menores o iguales que el año.

Al realizar esto, el resultado es el de la Figura 2. En esta figura se muestran las desviaciones para dos años particulares, 1990 y 1996, que corresponden a años de actividad solar alta y baja respectivamente. La principal característica es un patrón con dos mínimos, uno cerca del día del año

(DOY) 90 y otro alrededor del DOY 290, y dos máximos en los DOYs 190 y 365. Este comportamiento se debe a la anomalía semi-anual en la actividad magnética. El consenso general en la comunidad científica es que gran parte de este fenómeno es producido por el efecto de Russell y McPherron (1973): A lo largo del año la orientación del dipolo geomagnético cambia con respecto a la línea Sol-Tierra, la anomalía es máxima en los equinoccios cuando el dipolo está inclinado hacia la línea orbital de la Tierra porque la proyección del IMF en el campo geomagnético se maximiza. De forma similar, la actividad alcanza un mínimo durante los solsticios cuando la proyección del IMF es mínima. Sin embargo, existen otras hipótesis (Cortie, 1912; Bartels, 1932) y el mecanismo que provoca esta anomalía permanece en discusión en la actualidad (Cliver et al., 2000; Azpilicueta y Brunini, 2012).

ID	Longitud Geomag. (°)	Latitud Geomag. (°)
SIT	-77,69	60,21
NGK	97,64	51,64
KAK	-150,32	27,76
SJG	46,95	27,63
HON	-89,18	21,65
API	-96,69	-15,07
HER	85,27	-34,00
GNA	-170,29	-41,18
AIA	6,21	-55,49
PAF	134,42	-56,46

Tabla 1. Observatorios magnéticos utilizados en el trabajo ordenados por latitud geomagnética.
Table 1. Magnetic observatories utilized in this work ordered by geomagnetic latitude.

Si a los gráficos de la Figura 2 se le calcula un promedio simple móvil para cada DOY, utilizando una ventana de datos de 30 días, con el DOY en cuestión en el centro, se obtiene una curva suavizada, en la cual los períodos menores a 30 días han sido eliminados. Al restar la curva suavizada a las desviaciones, las curvas resultantes de aplicar este último procedimiento son como las que se observan en la Figura 3, en la que se encuentra la señal filtrada que llamaremos *H27*. La misma técnica puede ser aplicada con una ventana de menor o mayor cantidad de días, pero se eligió 30 como la cantidad óptima porque este valor otorgaba la mejor visualización.

Características de *H27*

En los gráficos de la Figura 3, *H27* es representado para dos años, uno de actividad solar alta y otro de actividad solar baja. Las características importantes que aparecen reflejadas en las curvas de *H27* son:

- La amplitud de la señal de ~27 días se ve significativamente aumentada para épocas de actividad solar alta.
- Aparece una modulación semi-anual resultando en amplitudes mayores durante marzo y septiembre.

H27 se encuentra presente para todos los observatorios analizados. Estas características no son específicas de los años de la Figura 3 (1996 y 1990), sino que son un patrón recurrente en todos los años y en todos los observatorios analizados. La modulación no es igual en todos los años y suele aparecer un poco desplazada en el tiempo. También, es diferente en amplitud para los meses de marzo y abril que para los meses de agosto y septiembre. La Figura 4 muestra a *H27* para dos años consecutivos del observatorio NGK. La señal se encuentra modulada por otra curva de periodicidad semi-anual.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN PARÁMETROS SOLARES - F27 Y Mg27

Parámetros F10.7 y Mg II

Como fue mencionado en la Introducción, las frecuencias del espectro correspondiente al rango de EUV y rayos X de la radiación solar, son capaces de ionizar los elementos neutros de la alta atmósfera y generar corrientes. Más específicamente es el flujo de radiación EUV el responsable de la ionización del O, O₂, NO y otras moléculas en la ionosfera terrestre que comprenden la mayor parte de los electrones libres. Resulta importante entonces monitorear la evolución de la radiación en estas frecuencias, para poder relacionarla con los parámetros en la ionosfera terrestre. Con este objetivo, suelen utilizarse distintos indicadores, que si bien no miden directamente las variaciones en las frecuencias de interés, tienen una correlación muy alta con dichas variaciones. A estos indicadores se los denomina proxys. Uno de los más comunes es F10.7, que mide la energía media de la densidad de flujo solar a una frecuencia de 2.8 GHz (longitud de onda: 10.7cm) en unidades de $10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ (unidades de flujo solar). A diferencia de otros índices, F10.7 es medido desde la superficie terrestre, lo que permite tener mediciones confiables sin importar las condiciones climáticas, con una larga serie de datos (desde 1947). Los valores diarios de F10.7 (tomados de la gran base de datos del instituto Goddard Space Flight Center: http://spdf.gsfc.nasa.gov/data_orbits.html) se muestran en la Figura 5, entre los años 1947 y 2011, que corresponde a la serie completa utilizada para el procesamiento. En esta figura pueden observarse varios ciclos solares, y es notable como la dispersión de los datos aumenta en los años de actividad solar alta.

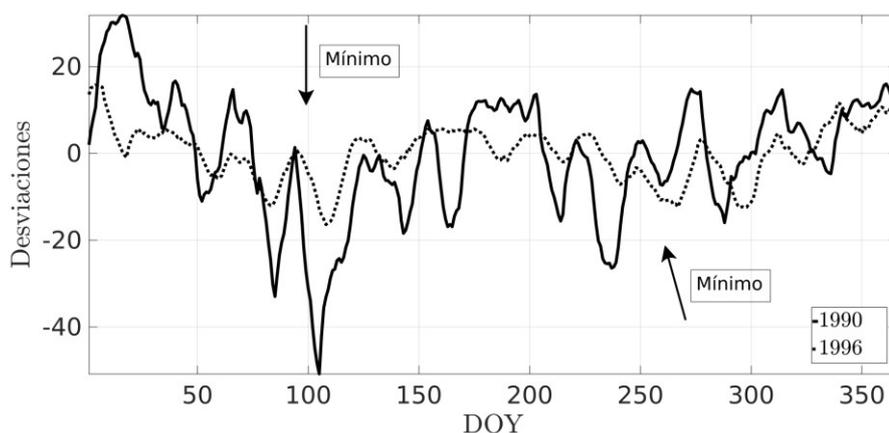


Figura 2. Valor medio por DOY de las desviaciones de H para la estación HER en los años 1990 y 1996. Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para eliminar ruido en la señal.

Figure 2. H deviations. Medium value per DOY for HER station at 1990 and 1996. A 10 days moving average filter was applied to eliminate noise in the signal.

Otro índice utilizado como un proxy es el Mg II. Se calcula tomando el cociente entre la intensidad de determinadas líneas de emisión del Mg II en 280 nm y el continuo en 280 nm. En el artículo de Viereck et al. (2001) se calculó un coeficiente de correlación de 0,996 con el flujo de radiación EUV en 30,4 nm, por lo que es un excelente indicador de la radiación en estas frecuencias. Los autores del artículo sugieren la utilización de este índice por sobre el F10.7. Este índice es calculado a partir de mediciones satelitales y provistos por NOAA y se encuentran en ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_UV/NOAAMgII.dat. Los datos abarcan un poco más de 2 ciclos solares completos como muestra la Figura 6.

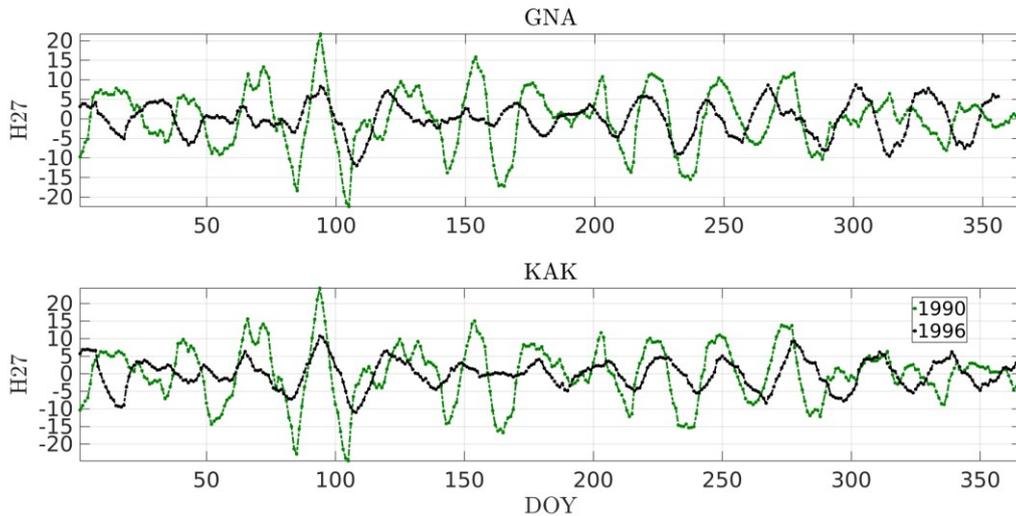


Figura 3. H_{27} en dos años distintos. 1996 (negro) de actividad solar baja y 1990 (verde) de actividad solar alta. Los datos corresponden a la estación GNA (superior) y KAK (inferior). Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 3. H_{27} for two different years. 1996 (black) a low solar activity year and 1990 (green) a high solar activity year. The data belongs to GNA station (up) and KAK station (down). A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization of the signal.

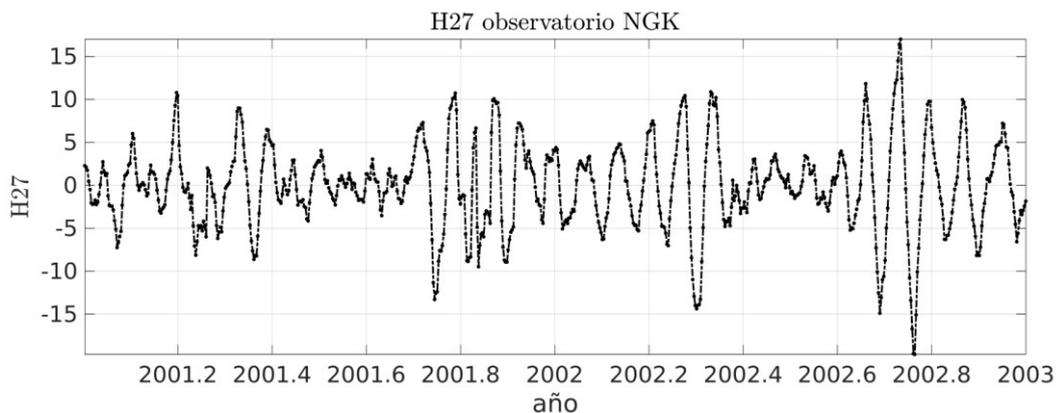


Figura 4. H_{27} para dos años consecutivos del observatorio NGK. La señal se encuentra modulada por otra de periodicidad semi-anual.

Figure 4. H_{27} for two consecutive years in the NGK observatory. The signal is modulated for another one with a semiannual periodicity.

La serie de datos de estos dos parámetros contienen valores anómalos, para poder procesarlas, se quitaron estos valores. Luego, si se aplica el mismo procedimiento que para obtener H_{27} se obtiene por ejemplo para $F_{10.7}$ el gráfico de la Figura 7 donde se muestra el resultado para 3 años consecutivos. Como se observa, la periodicidad de ~ 27 días también puede encontrarse en $F_{10.7}$ y en $Mg II$, y se indicarán como F_{27} y Mg_{27} respectivamente.

Una característica importante es que en estas señales no está presente ninguna modulación semi-anual, y tampoco es posible obtener una señal semi-anual como en el caso magnético. Las principales teorías que tratan de explicar la anomalía semi-anual concuerdan en que el fenómeno proviene del efecto que ocasionan los cambios en la corriente anillo a lo largo del año. Como se menciona en Daglis et al. (1999), las principales fuentes de la corriente anillo son las partículas de la ionosfera terrestre y del viento solar. Dentro de esta última están los protones y electrones que llegan del Sol y son atrapados por la magnetosfera. Por lo tanto, es de esperarse la ausencia de cualquier

señal semi-anual, ya que $F10.7$ y $Mg II$ reflejan los cambios producidos en la radiación solar y no en las propiedades del viento solar.

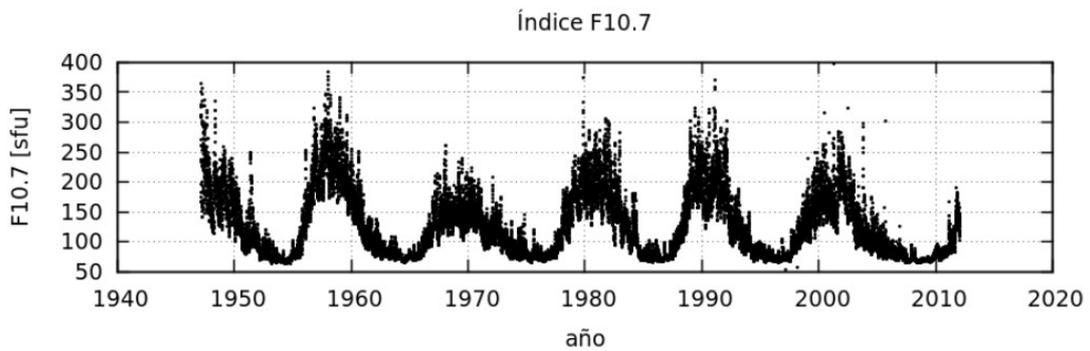


Figura 5. Valores diarios del índice $F10.7$ para la serie utilizada.
Figure 5. Daily values of the $F10.7$ index utilized in this work.

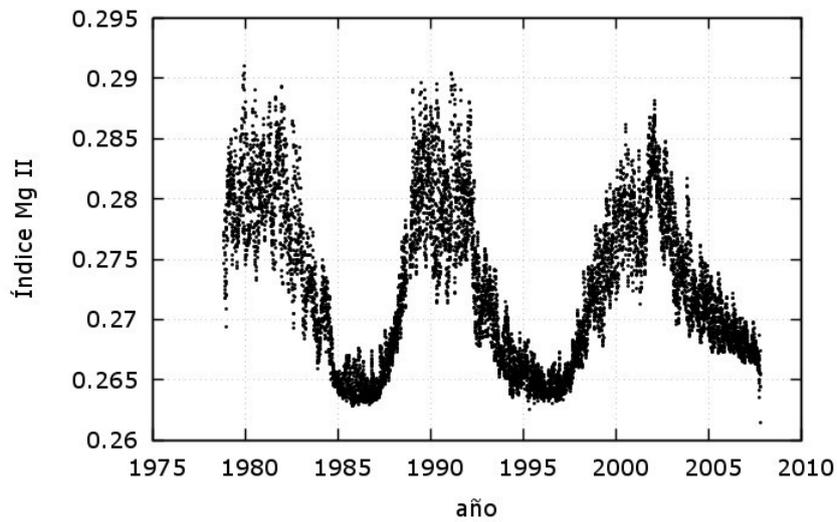


Figura 6. Valores diarios del índice $Mg II$ utilizados en este trabajo.
Figure 6. Daily values of $Mg II$ index utilized in this work

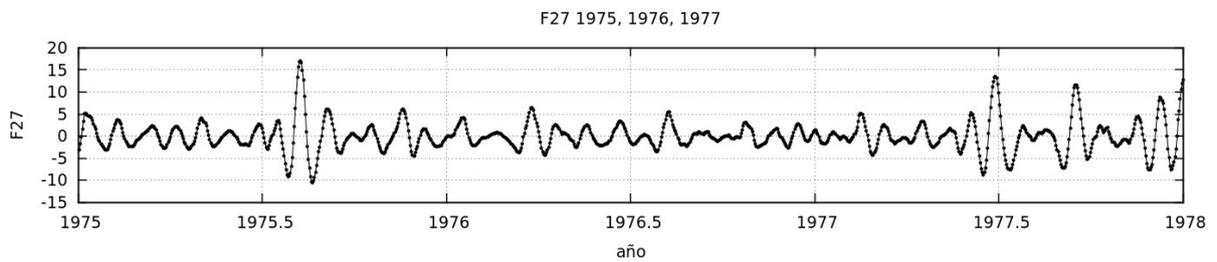


Figura 7. $F27$ para tres años consecutivos: 1975, 1976 y 1977.
Figure 7. $F27$ for three consecutive years: 1975, 1976 y 1977.

Señales F27 y Mg27

Si bien no poseen una modulación semi-anual como *H27*, son muy sensibles a los cambios en el ciclo solar, como se puede notar en la Figura 8, donde se encuentra graficado *F27* para el año 1990 de actividad solar alta y para el año 1984 de actividad solar baja.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN LA IONOSFERA – V27

El contenido total de electrones (TEC) se define como la cantidad de electrones libres atravesados por una onda electromagnética que viaja desde un satélite hasta un receptor. Si el satélite se encuentra sobre el cenit de la estación, de forma que el camino recorrido por la onda electromagnética es vertical, se lo denomina VTEC. Cuando la visual satélite-receptor no es vertical, se lo denomina STEC. El TEC es un parámetro muy importante en el estudio de la ionosfera basada en satélites.

Una de las primeras misiones que midió de forma exitosa el VTEC fue TOPEX/Poseidon. El satélite orbitaba a una altura de 1336 km y pasaba por el mismo lugar sobre la tierra cada 10 días (Jee, 2004). Si bien fue diseñada para mapear la altura del océano con el fin de estudiar los procesos de circulación oceánica, la incorporación de un altímetro de doble frecuencia en el satélite permitió a la comunidad aeronómica contar con una serie continua de más de 13 años de datos de determinaciones de VTEC casi directa (sin el uso de ninguna función de mapeo) y de excelente precisión para estudios de la distribución global del VTEC (Azpilicueta et al., 2006).

En este trabajo se utilizó la serie completa de 13 años de datos de la misión TOPEX/Poseidon de la siguiente manera: se promediaron los valores de 1 segundo de VTEC de la misión para tener una media global por día. Los instrumentos de la misión proveen los valores de VTEC sobre la superficie del mar, y como la masa continental es desigual en ambos hemisferios, esto produce una asimetría en la cantidad de valores disponibles para promediar entre el hemisferio norte y el sur. Por lo tanto, para balancear esta asimetría, los promedios se realizaron en un área específica del océano filtrando todos los valores fuera de ella al igual que en el trabajo de Azpilicueta et al. (2011). El área utilizada comprende los sectores (150°, 240°) y (300°, 360°) en longitud y (-60°, 60°) en latitud. De este modo, la serie temporal diaria obtenida tiene por un lado valores nulos (2,16% del total de días), correspondientes a los días en los que el satélite deja de medir por problemas técnicos o no pasa por el área en cuestión y días con distinta cantidad de datos considerados en el promedio. En tal caso los días con datos nulos fueron eliminados de la serie.

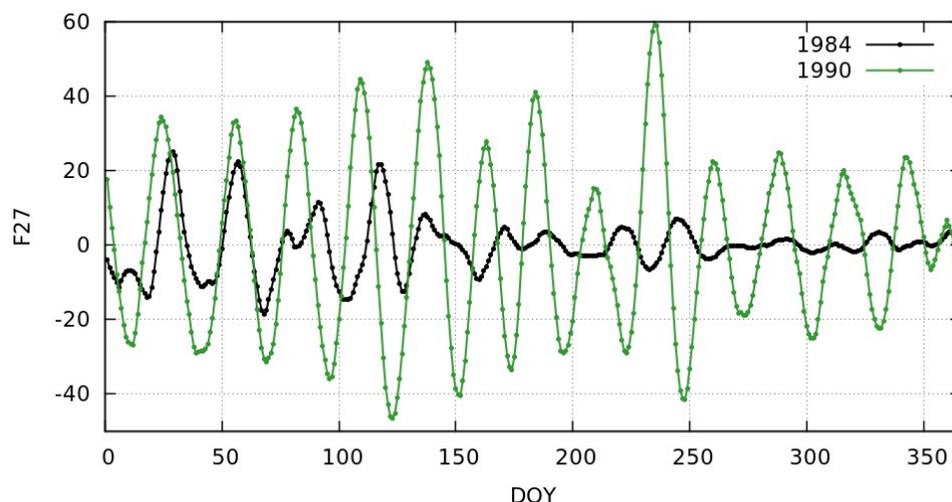


Figura 8. *F27* para el año 1984 de actividad Solar baja y 1990 de actividad Solar alta. Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 8. *F27* for a high solar activity year 1984 and for a low solar activity year 1990. A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization.

La Figura 9 muestra los promedios de VTEC para toda la serie temporal calculados según fue explicado anteriormente. Los rasgos más destacados de esta figura son, al igual que el índice $F10.7$, el aumento en la amplitud y en la dispersión de los datos de VTEC en épocas de actividad solar alta, lo que evidencia su dependencia con el ciclo solar.

Al VTEC de la Figura 9 se le aplicó la misma secuencia de procesamiento que para obtener las señales de ~ 27 días de las secciones anteriores y a la señal resultante se la denominó $V27$. Al restar la tendencia anual se observa una señal semi-anual. Sin embargo, cuando se resta el promedio móvil, no aparece ninguna modulación semi-anual pero sí una modulación importante con el ciclo solar como muestra la Figura 10.

COMPARACIÓN ENTRE LAS SEÑALES

En las secciones anteriores se ha encontrado una señal de ~ 27 días de periodicidad en distintas variables del medio Sol-Tierra. Como se menciona en la Introducción y las secciones posteriores, el procedimiento para derivarla consiste básicamente en una correcta elección de los datos, la resta de la tendencia lineal anual, y un promedio móvil dinámico como muestra el esquema de la Figura 11, donde se observan las características presentes en cada etapa del procesamiento. En esta figura, SA es el patrón semi-anual, que puede identificarse tanto en la actividad magnética, como en el TEC ionosférico. MODSA es la modulación semi-anual, que aparece bien marcada en la actividad magnética en todos los años y está ausente en el resto de las señales. CICLO es la modulación por el ciclo solar que se observa en todas las señales analizadas en este trabajo. El ciclo Solar parece ser el fenómeno más persistente en las señales del medio Sol-Tierra (o al menos en la variación de ~ 27 días de los parámetros). Por último, S27 es la señal con periodicidad de ~ 27 días. Al aplicar el promedio móvil (MA) resultan $H27$, $F27$, $Mg27$, y $V27$.

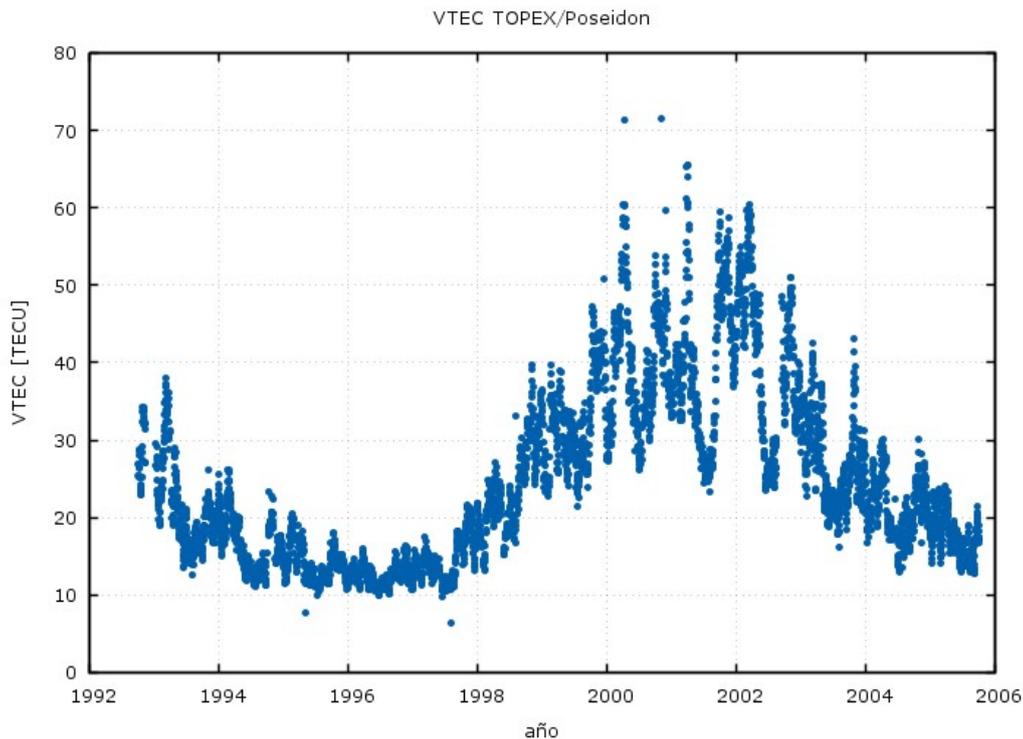


Figura 9. Serie de tiempo completa de VTEC utilizada en este trabajo.
Figure 9. VTEC complete time sequence utilized in this work.

El MA permite eliminar SA en la señal magnética e ionosférica, mientras que no tiene demasiados efectos en las señales radiativas ya que no está presente ninguna señal anual o semi-anual. En el caso de H o los índices solares, la serie temporal está conformada simplemente por los datos que entregan los centros internacionales. Para el caso del VTEC, promediar en las regiones adecuadas conlleva una tarea extra en el armado de la serie temporal a procesar.

Se estudió la correlación entre $F27$ y $V27$ y entre $Mg27$ y $V27$. En los años correspondientes a la serie más corta que es la de $V27$ y abarca 11 años en total (1992 - 2003), se calculó un coeficiente de correlación r por año para ambas correlaciones. La correlación entre $F27$ y $V27$ da un valor medio del coeficiente de 0,4 con un desvío porcentual del 9%, mientras que la correlación media entre $Mg27$ y $V27$ da un valor medio de 0,43 con un desvío de 4% resultando estos últimos valores ligeramente mejores. La correlación es muy similar en todos los años dado el bajo valor del desvío en ambos casos.

Si bien en ambos casos las series están correlacionadas (Figura 12), la metodología no filtra de ninguna manera periodicidades menores a 27 días por lo que la señal se ve enmascarada en ruido en muchos casos, lo que hace que el coeficiente de correlación no sea más alto.

Un aspecto interesante surge cuando se estudia el desfase entre las señales. Para hacerlo, se buscó el desfase en días de la señal $V27$ que hacía máximo el módulo de la correlación con $F27$ y $Mg27$ (o bien el máximo del módulo de la cross-correlation para distintos valores de corrimiento). Como las señales son aproximadamente periódicas, la cross-correlation será una función periódica por lo que puede suceder que a un aumento de $F27$ o $Mg27$ le corresponda una disminución de $V27$ en ese caso habría que buscar un mínimo en la cross-correlation. Por este motivo, se tomó el valor absoluto de la función. El resultado es un desfase de 1 día para ambos casos $F27/V27$ y $Mg27/V27$.

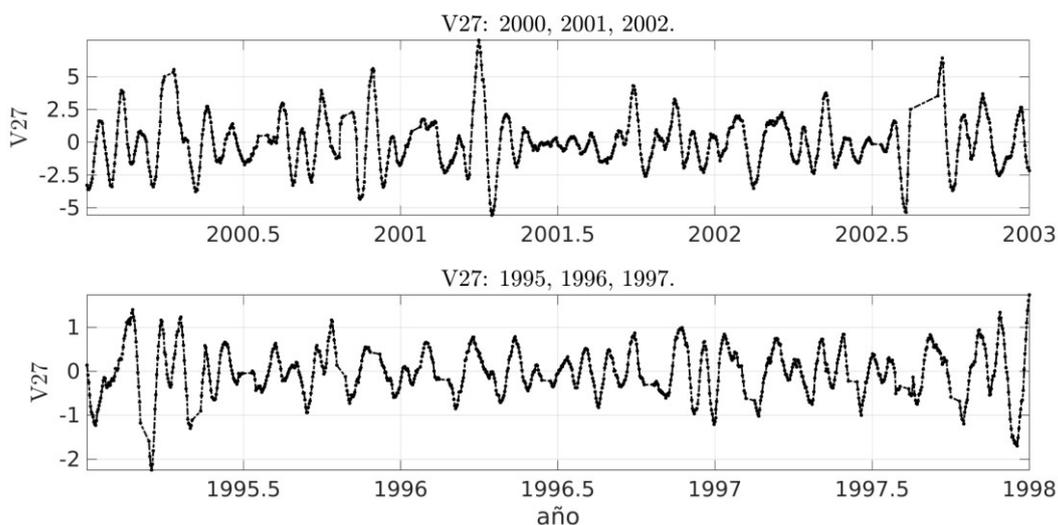


Figura 10. $V27$ para años de actividad solar alta (superior) y años de actividad solar baja (inferior). Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 10. $V27$ for years of high solar activity (up) and low solar activity (down). A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization.

La teoría clásica predice que la respuesta de la atmósfera a las variaciones en el flujo de radiación EUV (determinada por las constantes de ionización y recombinación) tenga un desfase de 1 hora. Sin embargo, la discrepancia con los retrasos obtenidos en este trabajo puede deberse a que no se tienen en cuenta los procesos en la atmósfera en este valor. Algunos autores han encontrado resultados dispares al estudiar este tema. Por ejemplo, en el artículo de Afraimovich et al. (2006), se encontró un desfase de 1,5 a 2,5 días. Los autores utilizan valores del índice $F10.7$ y el GEC (global electron content, ver referencia) diarios para obtener la señal de ~ 27 días. En el trabajo de Hocke (2008) se encuentra un desfase entre 0 y 3,5 horas utilizando el índice $Mg II$ y el TEC global.

Los gráficos de la correlación de ambos casos para valores de desfase entre -9 y 12 días se puede observar en la Figura 13. Si en este gráfico se analizan las diferencias entre la correlación en

los desfases 0, 1 y 2 días, se pueden comparar nuestros resultados con los de los autores mencionados. En el gráfico se muestra la cross-correlation normalizada por el valor máximo porque las escalas de las señales radiativas son muy distintas (como muestran las Figuras 5 y 6), lo que hace que la cross-correlation tenga valores muy distintos en ambos casos. Se observa que para $Mg27/V27$ la diferencia en la correlación para los desfases 0 y 1 es muy pequeño, y lo mismo ocurre para $F27/V27$ entre 1 y 2, por lo que estos resultados se condicen bastante bien con los de Afraimovich et al. (2006) y Hocke (2008).

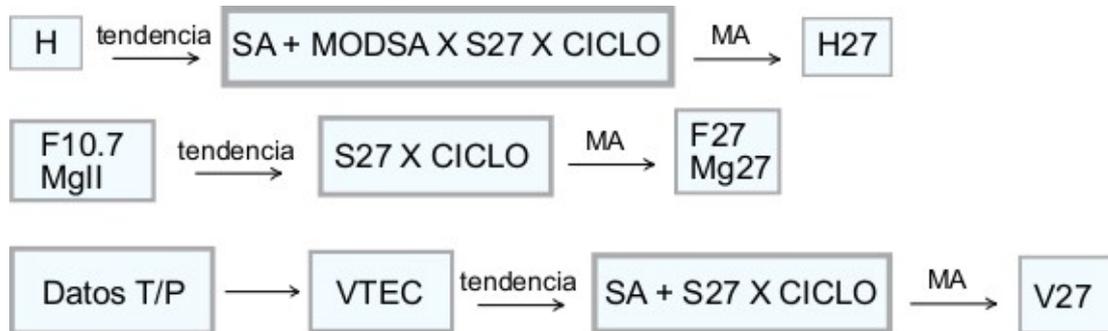


Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el esquema de procesamiento de todos los parámetros utilizados.
Figure 11. Flowchart showing the processing sequence of all the parameters utilized.

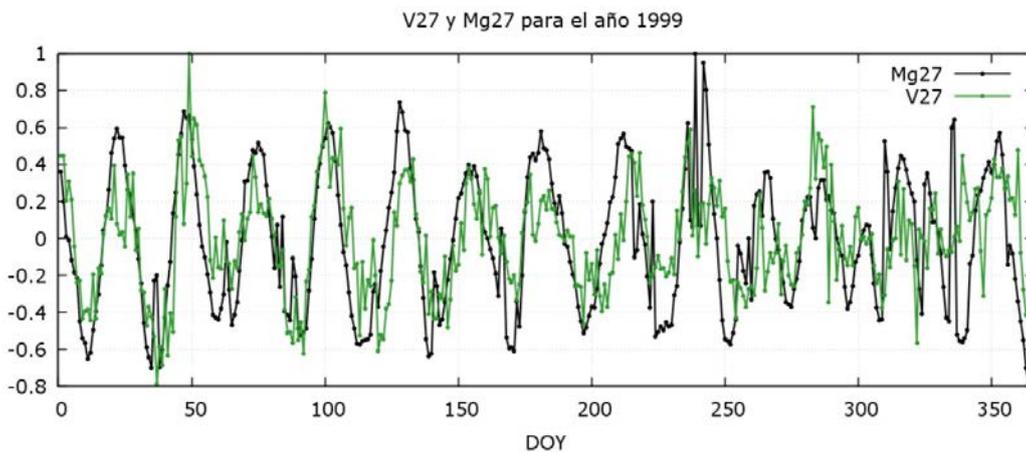


Figura 12. $V27$ y $Mg27$ normalizados por el valor máximo para el año 1999.
Figure 12. $V27$ y $Mg27$ normalized by the maximum value for the year 1999.

Las señales $F27$, $Mg27$ y $V27$ son de origen radiativo. Por otro lado, debido a que tanto las variaciones temporales de la radiación solar, como los parámetros geoeffectivos del viento solar y el IMF generan variaciones temporales en la actividad magnética terrestre, el origen de $H27$ no es tan claro. Un escenario posible sería que $H27$ fuera de origen radiativo, como ocurre por ejemplo con la variación solar diurna. Esta variación es una de las más regulares en la actividad magnética y es originada por las corrientes de dínamo en la capa E de la ionosfera (comúnmente referidas como campos Sq), producto de la interacción diaria entre la ionización producida por la radiación solar y los vientos termosféricos en el lado diurno de la Tierra. El otro escenario posible sería que el origen de $H27$ estuviera en la entrada de partículas cargadas a la magnetosfera como es el caso de la anomalía semi-anual en la actividad magnética, mencionada en las secciones anteriores. Al buscar el desfase entre $H27$ y $F27$, se pueden sacar conclusiones sobre este problema.

La Figura 14 muestra la cross-correlation entre $H27$ y $F27$ para los 10 observatorios en donde todas las curvas están normalizadas por el valor del máximo del módulo para desfasajes entre -30 y 30 días. En este caso se puede ver que a un aumento en la señal radiativa le corresponde una disminución de $H27$ aproximadamente 4 días después, es decir, existe una correlación opuesta máxima desfasada alrededor de 4 días. El valor del desfasaje que hacía máxima esta correlación opuesta entre ambas señales, para los 10 observatorios utilizados, arroja a $H27$ desfasada 4 días con respecto a $F27$ para 8 observatorios, mientras que en los 2 restantes el desfasaje es de 3 días. El recuadro en la parte inferior/derecha de la imagen muestra una ampliación de este fenómeno.

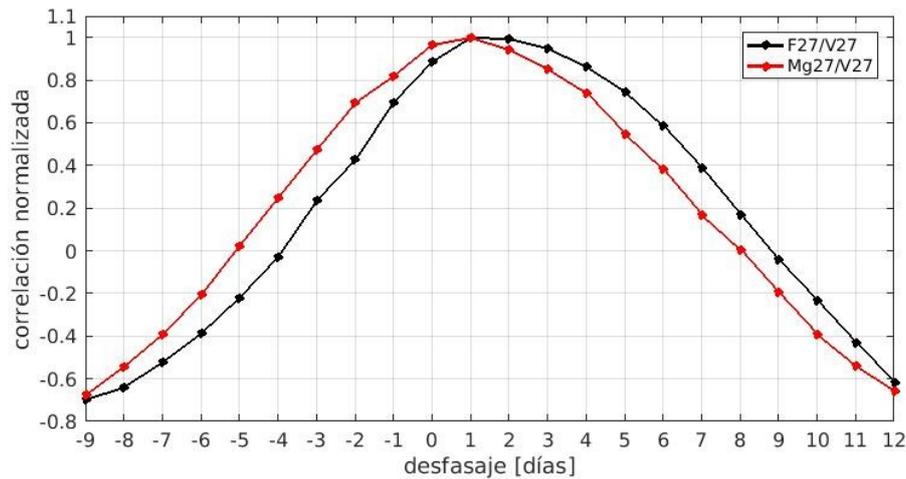


Figura 13. cross-correlation normalizada por el valor máximo entre las señales $Mg27/V27$ y $F27/V27$ para desfasajes entre -30 y 30 días.

Figure 13. Cross-correlation normalized by the maximum value for the signals $Mg27/V27$ and $F27/V27$ for lags between -30 and 30 days.

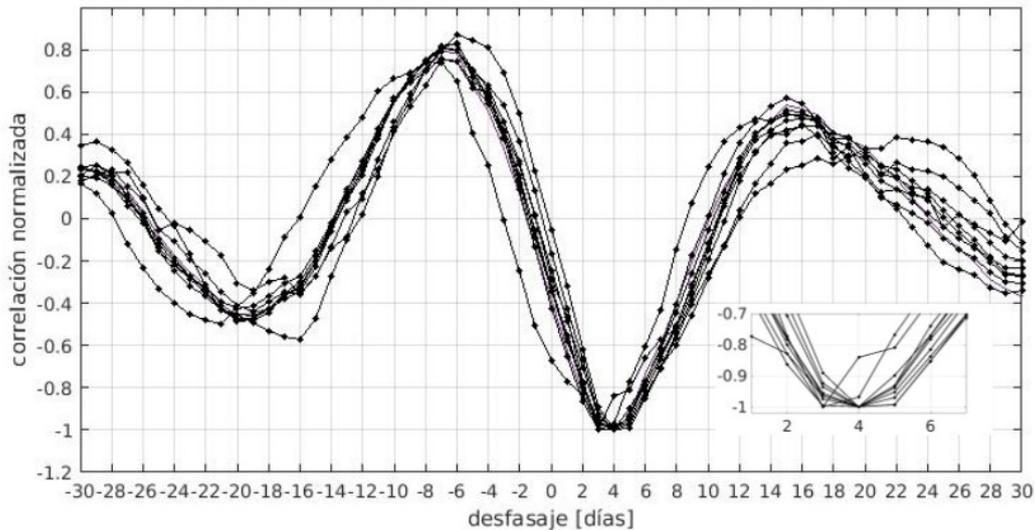


Figura 14. cross-correlation normalizada por el valor mínimo entre las señales $F27$ y $H27$ para los 10 observatorios utilizados en este trabajo. Se muestran las curvas para desfasajes entre -30 y 30 días, y aumentada como la mayoría de los mínimos están en 4 días.

Figure 14. Crosccorrelation normalized by the minimum value between the signals $F27$ and $H27$ for the 10 observatories utilized in this work. It is shown the curves for lags between -30 and 30 days, and bigger how most minimums are in 4 days.

Este desfase permite descartar el hecho de que la señal sea de origen radiativo, de otro modo el desfase sería 0 o 1 día como en los casos analizados anteriormente con $F27$ y $V27$, por lo tanto se puede decir que el origen de $H27$ se debe a los procesos de interacción entre el viento solar con la magnetosfera terrestre. Más aún, si se considera el valor de $1 \text{ UA} \approx 150$ millones de km se obtiene para 4 días de viaje, una velocidad aproximada del viento solar de $v_{\text{sw}} \approx 434 \text{ km s}^{-1}$ lo que concuerda bastante bien con los valores promedio que caracterizan el viento solar que son $v_{\text{sw}} \approx 468 \text{ km s}^{-1}$, y densidad de $8,7$ protones cm^{-3} . Este último análisis refuerza la conclusión sobre el origen de la señal.

Las curvas muestran un aumento de su dispersión cuando los desfases se alejan del rango 0 a 8 días aproximadamente. Hay varios motivos que pueden explicar este comportamiento. En primer lugar, está el hecho de que la señal de ~ 27 días no tiene una periodicidad uniforme. Cuando las curvas están desfasadas 4 días, los ciclos de ~ 27 días en ambas señales tienen la misma periodicidad, lo que hace que la correlación opuesta sea máxima. Cuando esto no ocurra, se correlacionan señales con períodos diferentes, lo que hace que el valor disminuya.

El hecho de que la mayoría de los observatorios den un retraso de 4 días permite descartar cualquier efecto hemisférico. Un aspecto interesante es que los 2 observatorios que dan 3 días de desfase son SIT y PAF, los cuales están ubicados en latitudes aurorales. En un análisis preliminar, se puede decir que la componente H en estas latitudes es más pequeña que la componente Z debido al aumento del ángulo de inclinación de las líneas del campo magnético terrestre, por lo que H puede no ser la componente óptima para el análisis en estas latitudes, ya que la mayor parte de la variación del campo no se ve reflejada.

PRINCIPALES CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Las relaciones encontradas entre las distintas señales en la sección anterior permiten establecer la conclusión principal de este trabajo: El origen de $H27$ se debe a la interacción entre el viento solar y la magnetosfera, mientras que el origen de $F27$, $Mg27$ y $V27$ es radiativo. La cross-correlation de las señales $F27$ y $H27$ obtenidas tras la misma secuencia de procesamiento entrega una metodología precisa de calcular los desfases entre ambas señales. A su vez, la cross-correlation entre $F27$ y $V27$ permite comparar los resultados obtenidos por otros autores en cuanto a las señales radiativas.

La red INTERMAGNET distribuye los datos de un gran número de estaciones magnéticas permanentes, (en varios casos con una serie temporal cercana a 100 años de datos). La incorporación de más observatorios en el análisis permitiría validar los resultados mencionados e investigar por qué el retraso de $H27$ en los observatorios en latitudes geomagnéticas altas es menor. De hecho, mientras más observatorios estén involucrados, los resultados son más representativos globalmente.

Por otro lado, aplicar la técnica utilizada en este trabajo permite evidenciar las características presentes y ausente en la señal de ~ 27 días en distintos parámetros utilizados. Por ejemplo, la modulación semi-anual de la amplitud está presente en $H27$ mientras que no se encuentran en las demás señales. Mientras que la modulación de la amplitud por el ciclo solar se encuentra en todas las señales.

Agradecimientos: Los autores de este trabajo agradecen a las siguientes instituciones por distribuir públicamente los datos utilizados en este trabajo: World Data centre for Geomagnetism (Edinburgh), Goddard Space Flight Center, National Oceanic and Atmosphere Administration, Jet Propulsion Laboratory.

REFERENCIAS

- Afraimovich E.L., E.I. Astafyeva, I.V. Zhivetiev, (2006). Solar activity and global electron content. Doklady Earth Sciences, 409(2):921-924.
- Apostolov E.M., D. Altadill, M. Todorova, (2004). The 22-year cycle in the geomagnetic 27-day recurrences reflecting on the F2-layer ionization. Ann. Geophys., 22(4):1171-1176.
- Azpilicueta F., C. Brunini, S. M. Radicella, (2006). Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude. Advances in Space Research, 38(11): 2324-2331..

- Azpilicueta F., C. Brunini, S. M. Radicella, (2011). Semi-annual Anomaly and Annual Asymmetry on TOPEX TEC During a Full Solar Cycle. *Geodesy for Planet Earth*, 136: 769-774.
- Azpilicueta F., C. Brunini, E. Camilión, (2012). The geomagnetic semiannual anomaly on the four Dst - fundamental observatories: Dependences with Sun-Earth physical parameters. *J. Geophys. Res.*, 117(A7).
- Azpilicueta F., C. Brunini, (2012). A different interpretation of the annual and semiannual anomalies on the magnetic activity over the Earth. *J Geophys. Res.*, 117(A8).
- Bartels J., (1932). Terrestrial-magnetic activity and its relations to solar phenomena. *J. Geophys. Res.*, 37(1): 1-52.
- Beck, J.G., (2000). A comparison of differential rotation measurements. *Solar physics*. 191(1): 47–70.
- Carrington, R.C., (1863). Observations of the spots on the sun from November 9, 1853 to March 24, 1861, made at Redhill. Ed. Williams and Norgate, London. pp 68.
- Cliver E.W., V. Boriakoff, K.H. Bounar, (1996). The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 27091-27109.
- Cliver E.W., Y. Kamide, A.G. Ling, (2000). Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 105(A2): 2413-2424.
- Clua de Gonzalez A.L., W.D. Gonzalez, S.L.G. Dutra, B.T. Tsurutani, (1993). Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the *Ap* index. *J. Geophys. Res.*, 98(A6): 9215-9231.
- Cortie A.L., (1912). Sun-spots and Terrestrial Magnetic Phenomena, 1898-1911: the Cause of the Annual Variation in Magnetic Disturbances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 73(1): 52-60.
- Daglis I.A., R.M., Thorne, W. Baumjohann, S. Orsini, (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Rev. Geophys.*, 37(4): 407-483.
- Fraser-Smith A.C., (1972). Spectrum of the geomagnetic activity *Ap*. *J. Geophys. Res.*, 77(22): 4209-4220.
- Hocke K., (2008). Oscillations in global mean TEC. *J Geophys Res*, 113(A4).
- Jee G., (2004). Analysis of TEC data from the TOPEX/Poseidon mission. *J. Geophys. Res.*, 109(A1): 121-127.
- Lean J.L., G.J Rottman, H.L. Kyle, T.N. Woods, J.R. Hickey, LC. Puga., (1997). Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200–400 nm). *J. Atm. Res. Atmospheres*, 102(D25):29939-29956.
- Mayaud P.N., (1980). Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. *Am. Geophys. Union Monograph*, 22. pp 154.
- Min K., J. Park, H. Kim, V. Kim, H. Kil, J. Lee, S. Rentz, H Lühr, L. Paxton, (2009). The 27-day modulation of the low-latitude ionosphere during a solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 114(A4).
- Neupert W. N., V. Pizzo, (1974). Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, 79(25): 3701-3709.
- Reuveni Y., C. Price, (2009). A new approach for monitoring the 27-day solar rotation using VLF radio signals on the Earth's surface. *J. Geophys. Res.*, 114(A10).
- Russell C.T., R.L. McPherron, (1973). Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 78(1): 92-108.
- Sargent H.H., (1986). The 27-day recurrence index. *Solar wind-magnetosphere coupling*, 77(22): 143-148.
- Schreiber H., (1998). On the periodic variations of geomagnetic activity indices *Ap* and *ap*. *Ann. Geophys.*, 16(5): 510-517.
- Singh Y.P., Badruddin, (2014). Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis. *Plan. And Space Science*, 96: 120-124.
- Sugiura M., 1964. Hourly values of equatorial *Dst* for the IGY. *Ann. Of the Int. Geophys. Year*. Pergamon Press, Oxford. Vol 35.
- Vasyliunas V.M., (1975). Theoretical models of magnetic field line merging. *Rev. in Geophys.* 13(1), pp 303.
- Viereck R., L. Puga, D. McMullin, D. Judge, M. Weber, W.K. Tobiska, (2001). The *Mg II* index: A proxy for solar EUV. *Geophys. Res. Let.*, 28(7):1343-1346.
- Ward F.W., 1960. The variance (power) Spectra of *Ci*, *Kp* and *Ap*. *J. Geophys. Res.*, 65(8): 2359-2373.

Recibido: Setiembre, 2016

Aceptado: Julio, 2017