

COMPORTAMIENTO SECULAR EN LOS DATOS GEOMAGNÉTICOS DE LOS OBSERVATORIOS PERMANENTES DE ARGENTINA

SECULAR BEHAVIOR IN THE GEOMAGNETIC DATA AT PERMANENT OBSERVATORIES IN ARGENTINA

P. A. Sallago*¹

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas – Universidad Nacional De La Plata
Paseo del Bosque s/n – (1900) La Plata – Prov. Buenos Aires – Argentina

Recibido: 29/12/2021 ; Aceptado: 27/04/2024

La variación secular del campo geomagnético es la variación temporal que se presenta en los distintos elementos del campo en escalas de tiempo entre algunos años y cientos o miles de años. Por otra parte, los impulsos o "jerks geomagnéticos" indican un cambio rápido en la pendiente de la variación secular. El origen de estos fenómenos se vincula al comportamiento del geodínamo y a la contribución de la interacción manto-núcleo externo.

La Red de Observatorios Magnéticos Permanentes (ROMP) está compuesta por las siguientes estaciones: "Las Acacias" (LAS) en la Provincia de Buenos Aires, "Trelew"(TRW) en la Provincia de Chubut, "Pilar"(PIL) en la Provincia de Córdoba y "Orcadas"(ORC) en la Antártida Argentina; las dos primeras dependientes de la Universidad Nacional de La Plata y las últimas dependientes del Servicio Meteorológico Nacional.

En el presente trabajo se analiza la variación secular y la determinación de los impulsos geomagnéticos en los elementos registrados en las estaciones de la ROMP en tiempos históricos con los datos registrados hasta el presente.

Palabras Clave: geomagnetismo, variación secular, impulsos seculares.

The secular variation of the geomagnetic field is the temporal variation that takes place in the field on time scales between few years to hundreds or thousands of years. On the other hand, impulses or "geomagnetic jerks" indicate a rapid change in the slope of the secular variation. The origin of these phenomena is linked to the behavior of the geodynamo and the contribution of the outer mantle-core interaction.

ROMP (acronym from spanish "Red de Observatorios Magnéticos Permanentes") is composed by the following observatories: "Las Acacias" (LAS) at Buenos Aires, "Trelew" (TRW) at Chubut, "Pilar" (PIL) at Córdoba and "Orcadas" (ORC) at the Argentine sector in Antarctic; the first two depend on the National University of La Plata and the latter on the National Meteorological Service.

In the present work one analyzes the secular variation and the determination of jerks in the geomagnetic elements recorded at the ROMP stations, in historical times up to the present.

Keywords: geomagnetism, secular variation, secular impulse.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2024.35.2.38>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Al analizar las variaciones del campo geomagnético debe tenerse en cuenta que el mismo está compuesto por contribuciones debido a fuentes de origen interno y externo [1]. Además, puede observarse que sus variaciones temporales tienen lugar en escalas de tiempo que va desde los segundos a los millones de años [2]. El campo de origen interno se compone por la contribución llamada "principal" y la correspondiente a la litósfera. El primero se genera en el núcleo externo, mientras que el segundo resulta de la superposición de la magnetización remanente e inducida de los materiales que constituyen las rocas de la corteza y el manto superior [3]. El campo de origen externo se debe a corrientes ionosféricas y magnetosféricas, siendo el principal actor en las variaciones de origen externo el Sol [1].

Las variaciones temporales llamadas variación secular (SV por su sigla en inglés) son aquéllas que pertenecen a la escala de tiempo entre algunos años y cientos de años

[4]. Estas variaciones son distintas en un sitio que en otro. Para determinar la variación secular de las componentes del campo se usan los valores promedios anuales de las observaciones de los elementos geomagnéticos y se calculan como la derivada primera entre los valores medios anuales [5]:

$$SV_j(tm - 0,5) = B_j(tm) - B_j(tm - 1), \quad (1)$$

ésto es la variación secular componente j centrada en $tm - 0,5$, donde el intervalo de tiempo tm es un año.

La SV también puede presentar un comportamiento "irregular", un cambio abrupto en su tendencia. Este fenómeno tiene lugar en la escala de tiempo entre los años y las décadas. Son los impulsos seculares o "jerks geomagnéticos" [6]. Estos cambios fueron estudiados desde 1978, donde se describe al jerk de 1970 como un cambio abrupto, un punto de separación entre dos comportamientos lineales de la componente analizada. Malin y Hodder [7] sugirieron que los impulsos tenían su origen en el comportamiento del campo de origen interno. Allredge [8], discutió sobre la

*pato@fcaglp.unlp.edu.ar

posible influencia de alguna componente de origen externo presente en los registros de las estaciones. Finalmente, mediante los estudios utilizando wavelet de Alexandrescu et al. [9] y el análisis en esféricos armónicos de Le Huy et al. [10] fue confirmado el punto de vista de que los impulsos seculares son de origen interno. Estos impulsos, postulados como debido a interacciones entre el manto y el núcleo externo, pueden identificarse en la SV por tener forma de V o de V invertida [6] y, además, pueden no ser observados en todas las componentes en todas las estaciones geomagnéticas.

Al revisar el comportamiento de los impulsos seculares durante algunas décadas se puso en evidencia que los mismos se presentan a intervalos de entre tres a seis años, algunos tienen impacto global y otros local [11]. Se pueden hallar “adelantados” en el hemisferio norte y “atrasados” en el hemisferio sur [12] por motivos que se le atribuyen a las características intrínsecas del geodínamo (ver por ejemplo, el mapa del estudio del jerk de 1969 en el trabajo de De Michelis y Tozzi [12]).

Actualmente han sido identificados una serie de impulsos para los años 1901, 1913, 1925, 1932, 1938, 1949, 1958, 1969, 1978, 1986, 1991, 1999, 2003, 2006, 2014 y 2017 (ver Bhardwaj y Subba-Rao [13], Torta et al. [14]).

Algunos de los autores mencionados han analizado los impulsos seculares estudiando los promedios mensuales en lugar de los promedios anuales de los registros de las estaciones. Esta elección depende de lo que se intente estudiar, de acuerdo con Pinheiro y Travassos [15]: si se desea atenuar las contribuciones externas se toman los promedios anuales mientras que si se desea precisar el momento del impulso secular se toman los promedios mensuales [15]. Más aún, distintos impulsos observados en una misma región pueden comportarse en forma diferente (ver Kotzé [11] y referencias en ese trabajo).

La comprensión de este fenómeno es de gran importancia en los estudios del interior terrestre porque proveen información tanto de la dinámica del núcleo como, posiblemente, de la conductividad eléctrica del manto [16, 17]. En los últimos años han sido propuestos diversos modelos para explicar este fenómeno: por ejemplo asociados a aceleraciones en el flujo del núcleo externo (ver por ejemplo Silva y Hulot [18]) y otros que sugieren que son expresiones de un comportamiento más “impredecible” del campo magnético principal [19]. El modelo más reciente es el publicado por Aubert y Finlay [20], ellos lo explican “como la propagación de paquetes de ondas magnetohidrodinámicas que cuando alcanzan la superficie del núcleo enfocan su energía a lo largo de las líneas de campo hacia el plano ecuatorial produciendo los cambios que se observan”.

En lo relacionado a los registros de las estaciones bajo análisis, en los trabajos de Gianibelli et al. [21] (1988), Gianibelli y Cabassi [22] (2001) se hallan algunos antecedentes para los estudios del comportamiento secular de los registros entre 1965-1987 para LAS y entre 1993-1999 para TRW, respectivamente. Ellos describen un comportamiento parabólico para el polinomio de ajuste de la serie de promedios anuales de los registros en las estaciones. Además, Gianibelli [23] realizó un estudio de la tendencia lineal de la variación secular y su pronóstico para el año 2100. En ese

trabajo incluyó los observatorios situados en Islas Argentinas AIA, ORC, TRW y PIL, contando con información hasta el año 2001,5 para PIL y ORC, y 2006,5 para TRW. Además, señalan que el hecho de que ajustaran adecuadamente la SV mediante un modelo lineal está asociado con que la serie de los valores promedios anuales mostraran mejor ajuste mediante polinomios de grado 2.

Es importante remarcar que tanto en los trabajos anteriormente mencionados como en Bhardwaj y Subba-Rao [13], existen antecedentes del ajuste de la serie de los promedios anuales mediante polinomios de alto grado.

Por otra parte, siempre en relación a los registros en la ROMP, tanto Alexandrescu et al. [9] como Pinheiro et al. [24] han estudiado los impulsos seculares, incluyendo los de 1969, 1978, y 1991 que han sido detectados globalmente. Alexandrescu et al. [9] han estudiado los datos de LAS y TRW, detectando en ellos los impulsos de 1969 y 1978. Pinheiro et al. [24] han tomado en su estudio la mayor cantidad de estaciones de las que se disponían los datos, en éste incluyen a las estaciones La Quiaca, (LQA), Pilar (PIL), Las Acacias (LAS) y Trelew (TRW) encontrando evidencias de los impulsos de 1969, 1978 y 1991 en algunas componentes en algunas estaciones.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento secular del campo geomagnético registrado en las estaciones PIL, LAS, TRW y ORC y se tendrá especial consideración a los intervalos de tiempo sin descripción o análisis previos. En el inciso 2 se presentan los datos estudiados, en el 3 se analiza la tendencia secular, la influencia solar, la posibilidad de contaminación por influencia del campo exterior en los registros, se calcula la variación secular y se describe su comportamiento. Se compara con los resultados descriptos por otros autores y, finalmente, se proponen señales candidatas para mostrar los impulsos seculares de 2014 y 2017.

II. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Los datos utilizados en este estudio son los valores promedios anuales (VPA) de las componentes al norte, al este, vertical, horizontal e intensidad total (X, Y, Z, H y F) de las series de datos de las cuatro estaciones de la Red de Observatorios Geomagnéticos Permanentes (ROMP). Esta red está conformada por las estaciones de PIL (Pilar, $-31^{\circ}40'$, $296^{\circ}7'$), LAS (Las Acacias, $-35^{\circ}0'$, $302^{\circ}19'$), TRW (Trelew, $-43^{\circ}16'$, $294^{\circ}37'$) y ORC (Orcadas, $-60^{\circ}44'$, $315^{\circ}13'$), su ubicación está representada esquemáticamente en el mapa de la Fig. 1. La Tabla 1 muestra el código de IAGA y el período de datos que se considera en el análisis. Los datos fueron obtenidos de centros internacionales, del British Geological Survey (BGS) <http://www.geomag.bgs.ac.uk> se descargaron los promedios anuales y de la red Intermagnet <https://www.intermagnet.org> para el cálculo de los promedios no publicados hasta noviembre de 2021, incluyendo datos de hasta el año 2020. Los valores correspondientes a LAS fueron calculados en el departamento de Geomagnetismo y Aeronomía de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata.

Los observatorios geomagnéticos PIL y ORC, dependientes del Servicio Meteorológico Nacional, fueron instalados en 1904 y 1905, el registro de las componentes geomagnéticas pasó de analógico a digital en 2011 y 2012



FIG. 1: Esquema de la ubicación de las estaciones geomagnéticas permanentes de la República Argentina (ROMP). Mapa realizado desde <https://www.google.com.ar/maps>.

respectivamente [23]. Los observatorios geomagnéticos de TRW y LAS, dependientes de la Universidad Nacional de La Plata, fueron instalados en 1957 y 1961, sus registros pasaron de analógicos a digitales en 1993 y 1997, respectivamente. Debe señalarse que únicamente se registra la intensidad total del campo geomagnético (F) en LAS desde 1997 [23].

En las Figs. 2 a 5 se muestran los VPA de las componentes en las cuatro estaciones, éstos se asignan temporalmente a la mitad del año.

III. ANÁLISIS

Comportamiento secular de los promedios anuales

Se calcularon los polinomios de ajuste para los valores medios anuales de las componentes en las cuatro estaciones, encontrando que los de mejor ajuste se hallan hasta grado tres. La variable utilizada w es el número de muestra asignado a los años de un intervalo de tiempo específico correspondiente al análisis de una serie en particular, esto es $w : 1, n$. Utilizar w en lugar de utilizar el valor “año” mejora el resultado para el cálculo de los coeficientes de los polinomios.

La función de ajuste $f(w)$ es un polinomio,

$$f(w) = ajw^j \quad (2)$$

TABLA 1: Estaciones, componentes e intervalos de tiempo con datos disponibles

Estación	H,X,Y,Z,F
PIL	1905,5 – 2001,5; 2005,5 – 2007,5; 2012,5 – 2020,5
LAS	1961,5 – 1996,5; 2001,5 – 2020,5
TRW	1957,5 – 2019,5
ORC	1905,5 – 1912,5; 1929,5 – 1959,5; 1995,5 – 2001,5; 2016,5 – 2020,5

con $j = 0, 3$, donde w es el número de dato en cada intervalo, como se ha definido anteriormente.

Para los datos de las estaciones PIL, LAS y TRW se consideró como único intervalo a 1905,5-2020,5; 1961,5-2020,5 y 1957,5-2020,5 para el cálculo del ajuste, respectivamente; mientras que para los datos de ORC se procedió de la siguiente manera: para el estudio de las componentes X e Y se tomaron los intervalos 1905,5-1912,5 y 1929,5-1954,5, mientras que para el estudio de las otras componentes (Z, H y F) se consideraron los intervalos 1905,5-1912,5; 1929,5-1954,5 y 2016,5-2019,5. En las Tablas 2a - 2e se muestran los coeficientes de los polinomios de mejor ajuste calculados para las componentes registradas en las estaciones analizadas en función del número de dato.

Puede verse que las tendencias seculares de los valores medios anuales de las estaciones vienen dadas, en forma predominante, por parábolas. La tendencia secular con ajuste parabólico calculada para F en las estaciones de LAS y TRW para los valores medios anuales (ver Tabla 2e) es acorde al comportamiento referido por otros autores. Recordar que los datos para LAS y TRW han sido analizados previamente en los intervalos 1965,5-1987,5 para promedios mensuales [21] y 1993,6-1999,9 para los valores medios de los días quietos en el intervalo 00-03hs TU [22], respectivamente.

TABLA 2a: Coeficientes del mejor ajuste polinómico para la componente al norte

	a0	a1	a2	a3
XPIL	25757,5	-44,89	-0,15	—
XLAS	21616,4	-75,79	-0,01	—
XTRW	22513,3	-66,61	-0,01	—
XORC	25599	-46,06	—	—
	24250,3	-82,3	0,21	—

TABLA 2b: Coeficientes del mejor ajuste polinómico para la componente al este

	a0	a1	a2	a3
YPIL	4403,8	-59,24	0,04	—
YLAS	-378,8	-58,45	0,37	—
YTRW	3811,5	-55,39	0,14	—
YORC	2392,5	-37,69	—	—
	1469,5	-36,78	0,23	0,01

Influencia del comportamiento solar y de las corrientes magnetosféricas

Es importante poder evaluar la posible influencia tanto de la actividad solar como de las corrientes magnetosféricas en el análisis de las series de datos registrados en las estaciones

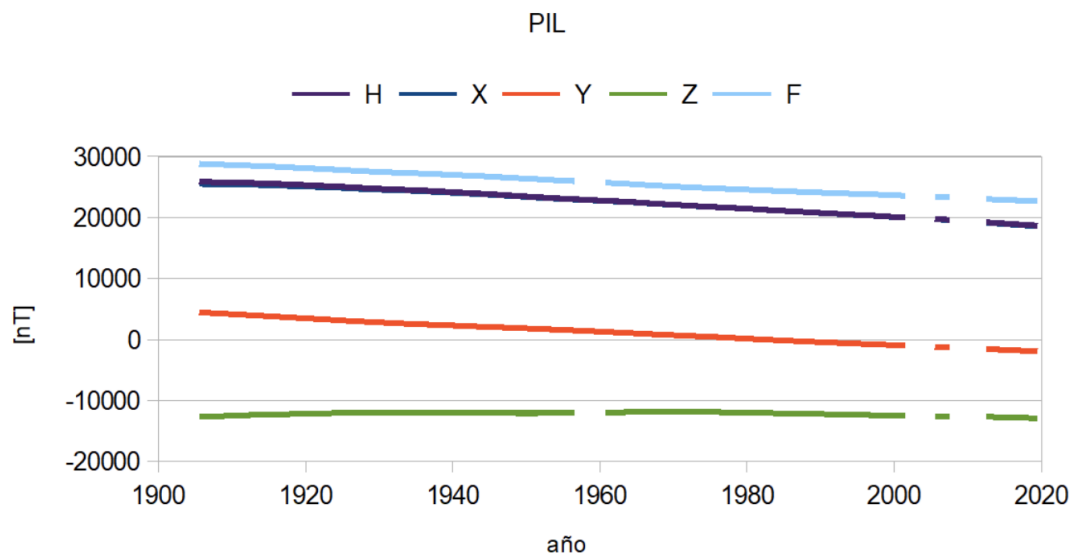


FIG. 2: Valores promedios anuales de las componentes H, X, Y, Z, F en la estación geomagnética de PIL.

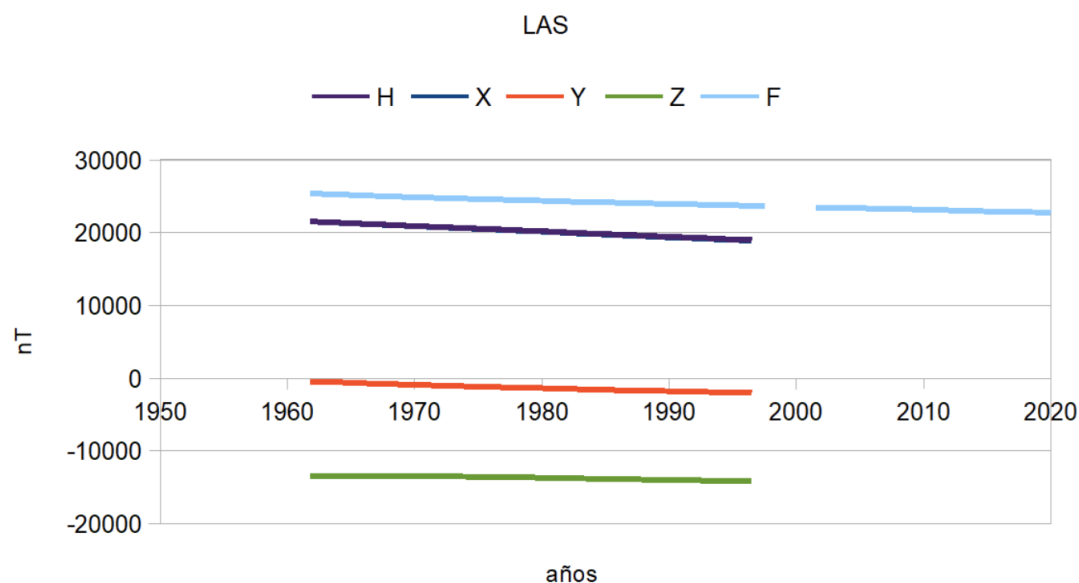


FIG. 3: Valores promedios anuales de las componentes H, X, Y, Z, F en la estación geomagnética de LAS.

TABLA 2c: Coeficientes del mejor ajuste polinómico para la componente vertical

	a0	a1	a2	a3
ZPIL	-12561	25,22	-0,25	—
ZLAS	-13381,4	-5,21	-0,49	—
ZTRW	-18614,9	25,97	-0,14	—
ZORC	-36114	88,14	—	—
	-33151,7	31,31	7,42	-0,21
	-26150,1	-978,2	409,8	-50,6

TABLA 2d: Coeficientes del mejor ajuste polinómico para la componente horizontal

	a0	a1	a2	a3
HPIL	26140	-54,83	-0,09	—
HLAS	21618,2	-74,22	0,03	—
HTRW	22849,8	-75,03	0,05	—
HORC	25710,2	-49,15	—	—
	24297	-84,85	0,27	—
	18363,3	-1061,2	487,9	—

cuando se desea estudiar los efectos de origen interno, como es el caso de la SV.

Influencia Solar en los promedios anuales

Como es bien conocido, en 1843 Schwabe discutió la existencia del ciclo solar de 11 años para el comportamiento

de las manchas solares y en 1852 se halló que éste y la ocurrencia de tormentas geomagnéticas se encuentran relacionados [25]. Con el fin de mostrar el comportamiento de la actividad solar se recurrió a la serie del número de manchas solares Rz, para el intervalo de interés (desde 1900 al presente), obtenidos desde el Observatorio Real de Bélgica

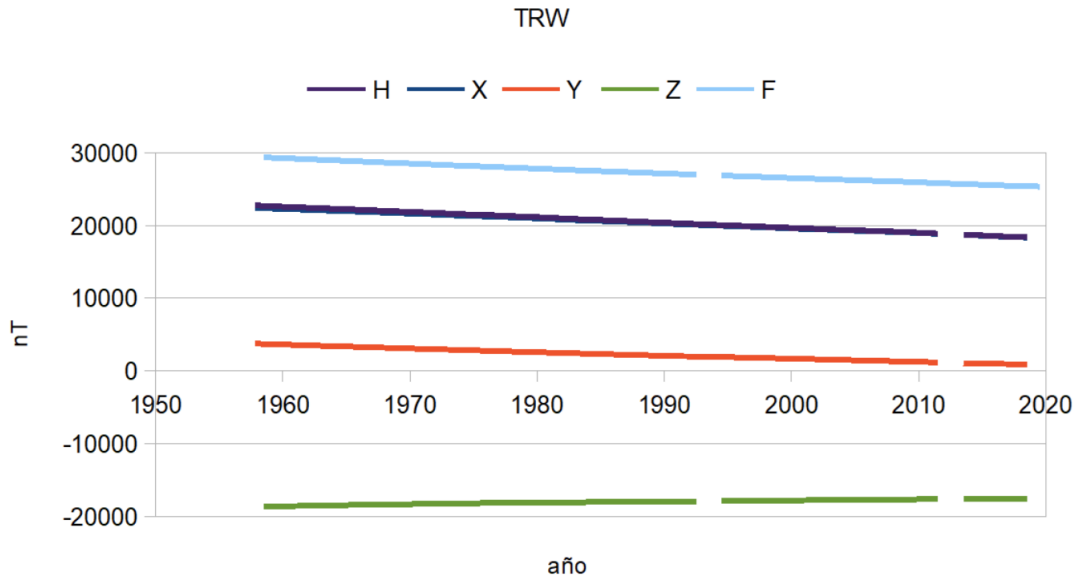


FIG. 4: Valores promedios anuales de las componentes H, X, Y, Z, F en la estación geomagnética de TRW.

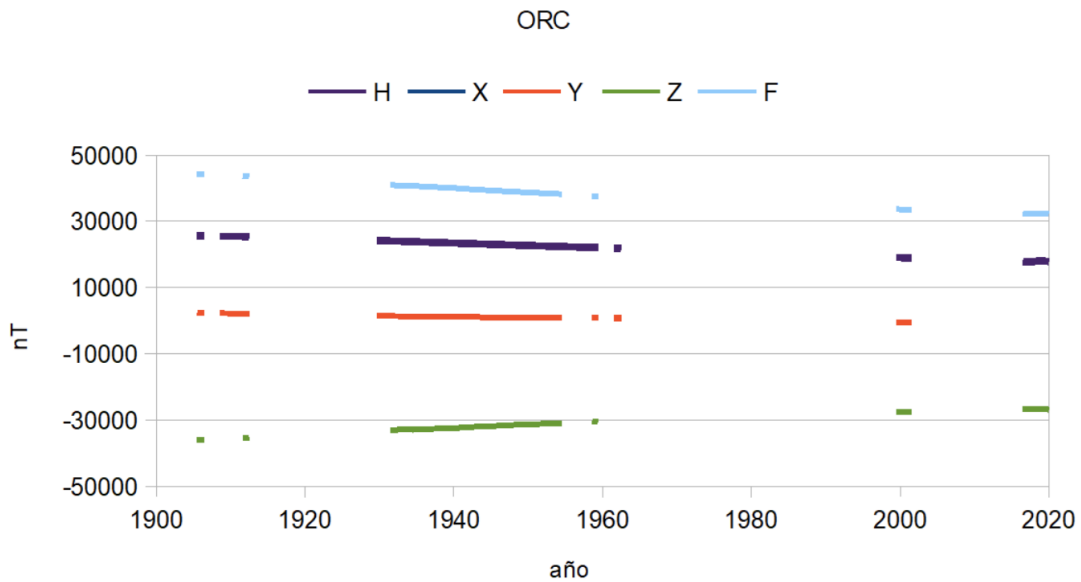


FIG. 5: Valores promedios anuales de las componentes H, X, Y, Z, F en la estación geomagnética de ORC.

TABLA 2e: Coeficientes del mejor ajuste polinómico para el módulo del campo (f)

	a0	a1	a2	a3
FPIL	29028,7	-62,72	0,06	—
FLAS	25385,6	-54,33	0,18	—
FTRW	29409,1	-74,76	0,15	—
FORC	44343,8	-101,4	—	—
	41007,7	-69,83	-6,61	0,19
	32521,9	-112,2	6,85	—

<http://sidc.be/silso>.

Por otra parte, autores de otras disciplinas, por ejemplo: Usoskin et al. [26] (2005) en el análisis comparativo de la actividad solar, los rayos cósmicos y la temperatura terrestre o Love et al. [27] (2011) en la ponderación de la correlación

entre el número de manchas solares, la actividad geomagnética y la temperatura global, han discutido ampliamente el problema del uso de los valores de los coeficientes de correlación cruzada. La dificultad del uso de la correlación cruzada en el análisis de series de datos temporales reside principalmente en la posible no estacionariedad de los datos. Esta propiedad de las series de datos debe verificarse con anterioridad al cálculo de los valores de los coeficientes de correlación cruzada ya que, en estas condiciones, no constituyen relaciones reales entre las variables sino espúreas [28]. Mayores apreciaciones pueden encontrarse en el trabajo de Guevara Díaz [28] (2014).

A continuación, se describe el procedimiento por el que es posible observar de manera intuitiva la no estacionariedad de las series de los datos de las componentes del campo

geomagnético registradas en las estaciones, según el criterio de análisis de Love et al. [27] (2011). A los valores de las series de datos (S), que se extienden temporalmente entre los ciclos solares 14 a 25, se les efectúa el promedio por ciclo solar. Los promedios por ciclo solar se forman para intervalos definidos desde un mínimo de manchas solares hasta el siguiente y se denotan con $\langle S \rangle$. A modo de ejemplo, se grafican los pares de conjuntos de datos de S y $\langle S \rangle$ para las componentes horizontal y vertical de las estaciones PIL y TRW, respecto del número de manchas solares. Aquí se dividieron los datos de la siguiente manera: ciclos solares 14-18 (símbolos en naranja), 19-22 (símbolos en azul) y ciclos 23-25 (símbolos en verde). En las Figs. 6 y 7 (a y b) se pone en evidencia que las distribuciones han cambiado con el tiempo y que, por lo tanto, presentan no estacionariedad.

Tanto Usoskin et al. [26] (2005) como Love et al. [27] (2011) han propuesto estrategias para resolver el inconveniente citado anteriormente y poder decidir la consistencia de los valores de las correlaciones. A pesar de que estos métodos están disponibles, en este trabajo se muestra solamente la no estacionariedad de las series de datos.

Es de importancia extraer la contribución debida al campo de origen externo, cuando se busca analizar la variación secular en las series de datos. En este tópico existen dos puntos de vista diferentes en relación a las variaciones correspondientes al ciclo solar. Por un lado, según Manda et al. [29] (2010) las variaciones con ciclo de 11 años son atribuibles directamente a fuentes externas. Siguiendo esa afirmación pueden encontrarse una larga lista de artículos de referencia Demetrescu y Dobrica [30] (2014), Dobrica et al. [31, 32] (2013; 2018), donde se aplican diversas técnicas con el objetivo de eliminar la contribución del campo de origen externo por el ciclo de 11 años.

Por otra parte Finlay et al. [33] (2017), resalta la complejidad de caracterizar en forma adecuada la contribución del campo externo, ya que que las fuentes en el núcleo también podrían contribuir a la señal de 11 años, por ejemplo mediante la señal de 6 años [34-36]. Otras variaciones temporales del orden de la decena de años y subdecenales, también pueden atribuirse a variaciones en el movimiento del núcleo e interacciones en el límite núcleo-manto [37-40].

En el concepto de Wardinski [41] (2005): “filtrar una serie de datos es una tarea delicada de realizar: por un lado la aplicación de un filtro puede remover parte de la información y, por otra parte, puede introducir una señal artificial. El balance de los efectos es la clave para poder hacer conclusiones”. Con el objetivo de buscar dicho “balance” en este trabajo se emplean dos metodologías, la primera filtrando la series de datos mediante la síntesis armónica correspondientes a períodos llamados “solares o de origen externo” (siguiendo la idea de Manda). La otra metodología, siguiendo la idea de Finlay, fue tomada del trabajo de Zossi et al. [42] (2021). La misma consiste en un filtrado realizado mediante los residuos entre cada serie de datos y la serie de Rz11, los promedios con ventana móvil de longitud 11 años calculado sobre el número de manchas solares Rz.

Se ponderó la influencia solar mediante el análisis armónico de las series de los residuos, la diferencia entre la serie de valores promedios anuales y su respectivo polinomio de

ajuste. El análisis armónico pudo llevarse adelante para los intervalos en que la series de datos fueran suficientemente largas (mayores a doce años consecutivos). A continuación se muestran los valores de los coeficientes cn del desarrollo de Fourier en el análisis de las series de los residuos de los promedios anuales (ver Tablas 3a - 3d). Estos valores se redondearon a la décima de nT. También se ha determinado que el valor del ruido es de 4nT (PIL y LAS) y de 2nT (TRW y ORC).

TABLA 3a: Coeficientes del análisis armónico - series de los residuos en las distintas componentes PIL

n	X cn [nT]	Y cn [nT]	Z cn [nT]	H cn [nT]	F cn [nT]
1	95,5	25,1	94,8	55,4	127,1
2	54,7	3,4	6,7	17,3	16,23
3	24,8	13,6	7,7	16,1	6,4
4	20,5	8,3	0,8	5,2	7,4
5	9,6	3,9	1,9	6,1	2,1
6	9,5	3,9	3,6	4	2
L (1905,5-1958,5) L (1959,5-2001,5)					

TABLA 3b: Coeficientes del análisis armónico - series de los residuos en las distintas componentes LAS

n	X cn [nT]	Y cn [nT]	Z cn [nT]	H cn [nT]	F cn [nT]
1	2,7	0,3	6,9	3,3	15,7
2	6,7	2,2	22	6,5	11,5
3	6	2	3,5	5,8	12,3
4	3,7	6,9	9,5	3,4	5,7
5	4,7	3,1	6,6	4,5	13
6	4,1	4,3	1,9	4	6,4
L (1960,5-1996,5) L (1998,5-2020,5)					

TABLA 3c: Coeficientes del análisis armónico - series de los residuos en las distintas componentes TRW

n	X cn [nT]	Y cn [nT]	Z cn [nT]	H cn [nT]	F cn [nT]
1	17,1	10,5	12,3	15,1	25,2
2	6,1	9,7	4,3	10,3	6,9
3	4,2	7,9	3,2	1,7	5,6
4	5,9	5,4	2,9	2,8	5
5	3,3	3,4	1,4	1,9	3,8
6	6,3	3,1	1,3	1,7	5,4
L (1957,5-1993,5) L (1994,5-2020,5)					

En la Fig. 8 se muestran los valores de los coeficientes del desarrollo de Fourier en función de los períodos correspondientes, separados por componentes. Entre los 9 y 13 años yacen los coeficientes correspondientes al ciclo solar, de 18 a 26 años al doble ciclo y entre 36 y 52 años corresponden a cuatro veces el ciclo solar.

Finalmente se muestra, del conjunto de valores residuales de las componentes y las síntesis correspondientes, un caso en el que resulta de interés evaluar la posibilidad de contaminación por contribución de campo externo, que es siguiente punto de estudio (ver Fig. 9).

En la figura, la línea a trazos negra corresponde al residuo mientras que la línea a trazos magenta corresponde al residuo sintético, calculado con los coeficientes de los armónicos correspondientes a un ciclo solar, el doble y cuatro veces el mismo. La línea continua en cian corresponde al valor residual obtenido mediante el estudio con ventana

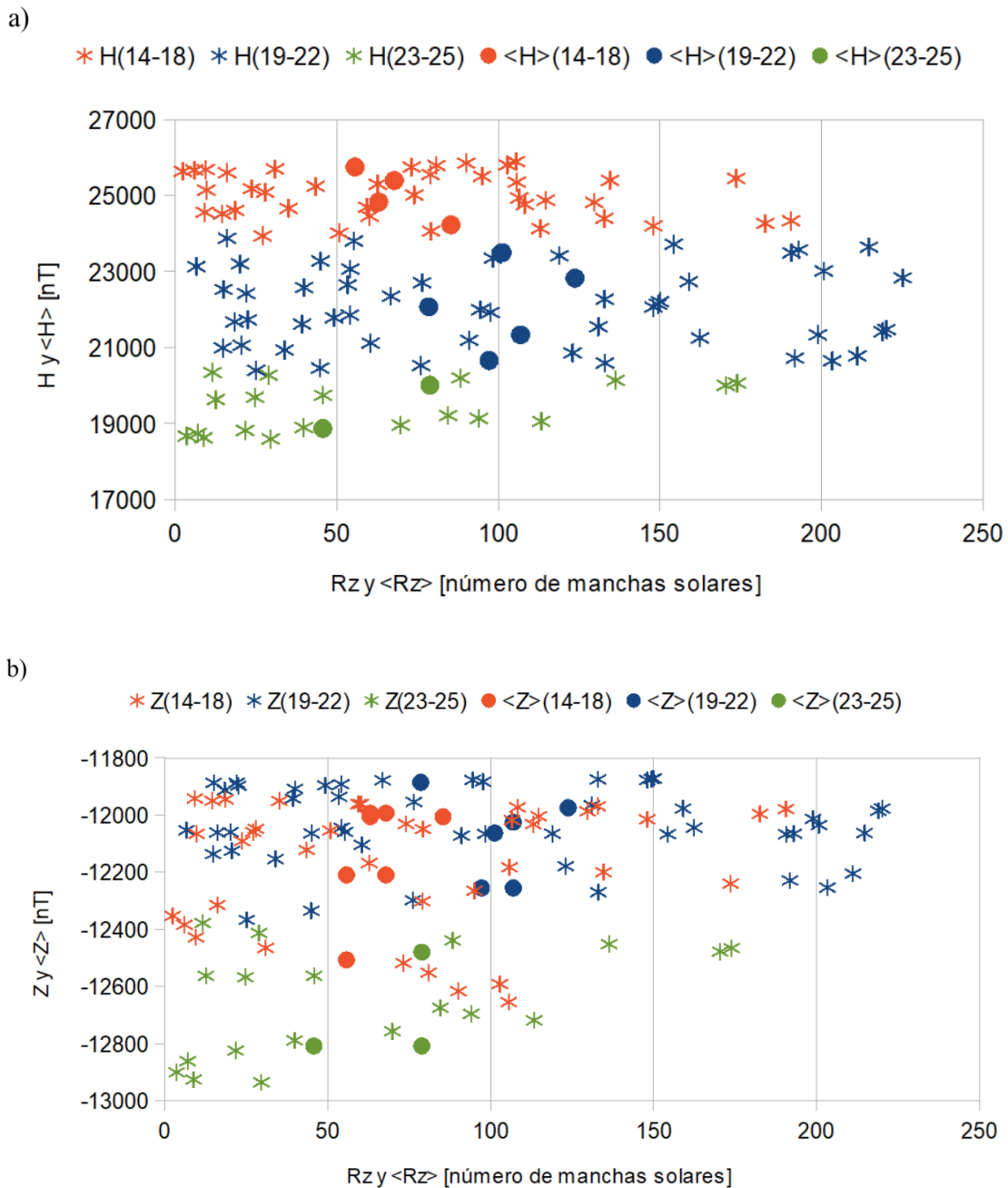


FIG. 6: (a) Valores promedios anuales de las componentes H y promedio por ciclo solar $\langle H \rangle$. (b) Valores promedios anuales de la componente Z y promedio por ciclo solar $\langle Z \rangle$ en la estación geomagnética de PIL.

TABLA 3d: Coeficientes del análisis armónico - series de los residuos en las distintas componentes ORC

n	X cn [nT]	Y cn [nT]	Z cn [nT]	H cn [nT]	F cn [nT]
1	1,6	1	8,6	1,9	2,7
2	9,4	1,5	6,7	9,6	17,6
3	14	3,9	8,6	13,8	32,4
4	9,7	4,9	19,6	10,6	27,9
5	9,9	3,2	19,2	9,9	17,9
6	6,5	1	7,2	7,3	23,1
L (1929,5-1958,5)					

móvil Rz11. Se observa que los residuos obtenidos mediante el método de ventana móvil Rz11 son comparables a los filtrados sintéticos.

En lo que sigue de este trabajo se analizan los valores resultantes de restar a los valores residuales la correspondiente serie de los residuos sintética.

Influencia de la contribución del campo de origen externo en los promedios

Según consta en la página del BGS, los promedios anuales enviados por las estaciones a este centro internacional es calculado de forma diversa en origen: ya sea por déficit de meses registrados, por cálculo mediante determinaciones absolutas y otras causas. En ocasiones se calculan con los datos de todos los días, o sea que se incluyen los valores de los días geomagnéticamente perturbados. Al realizar el promedio anual se espera que la contribución de los

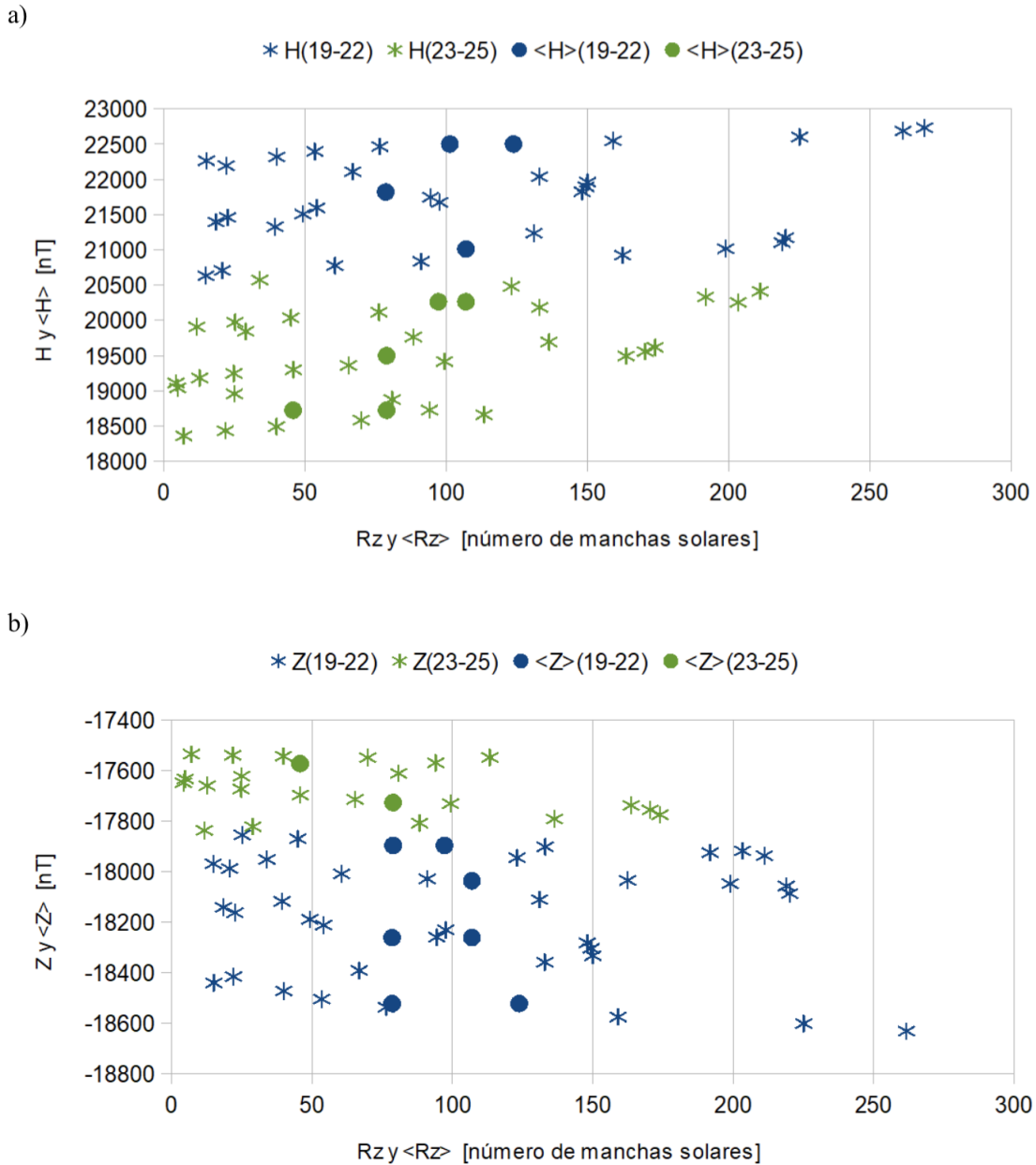


FIG. 7: (a) Valores promedios anuales de las componentes H y promedio por ciclo solar $\langle H \rangle$. (b) Valores promedios anuales de la componente Z y promedio por ciclo solar $\langle Z \rangle$ en la estación geomagnética de PIL.

días perturbados resulte atenuada. De acuerdo con Maus y Weidelt [43], es posible determinar la influencia del campo externo mediante el análisis de la correlación entre la variación secular con el índice Dst y su derivada. El índice Dst es un indicador de la actividad magnetosférica correspondiente a la corriente anillo, por lo que brinda una medida de la influencia de los días perturbados en los registros y la derivada temporal del índice Dst indica la influencia del ingreso de energía del viento solar a la magnetósfera [44]. Si la correlación entre el índice Dst y la SV es alta estaría indicando la influencia de la corriente anillo en los valores utilizados. Los valores del índice Dst se obtuvieron de http://isgi.unistra.fr/indices_dst.php y se calcularon los promedios anuales y su derivada.

A continuación se muestran en las Tablas 4a - 4c los valores de los coeficientes de correlación con la SV calculada

con los residuos de las series de los promedios anuales filtrados, para cada componente y cada estación, excepto para los datos de la estación ORC.

Previamente se definió a la variación secular como la derivada primera de los datos de los valores medios anuales, ver la ecuación (1). Para estudiar la variación secular en todos los casos y, en particular, para SVZ en PIL, se procedió al filtrado de los residuos para las frecuencias mencionadas anteriormente. La SVZ en PIL, calculada a partir de la señal filtrada, presenta los siguientes valores en los coeficientes de correlación: para el coeficiente de correlación entre PILSVZ y Dst es -0,22 y para el coeficiente de correlación entre PILSVZ y $dDst/dt$ es 0,37. En consecuencia, luego de filtrar las frecuencias correspondientes al ciclo solar, el doble y cuatro veces el mismo, la SV no resulta influenciada por las contribuciones del campo de origen externo.

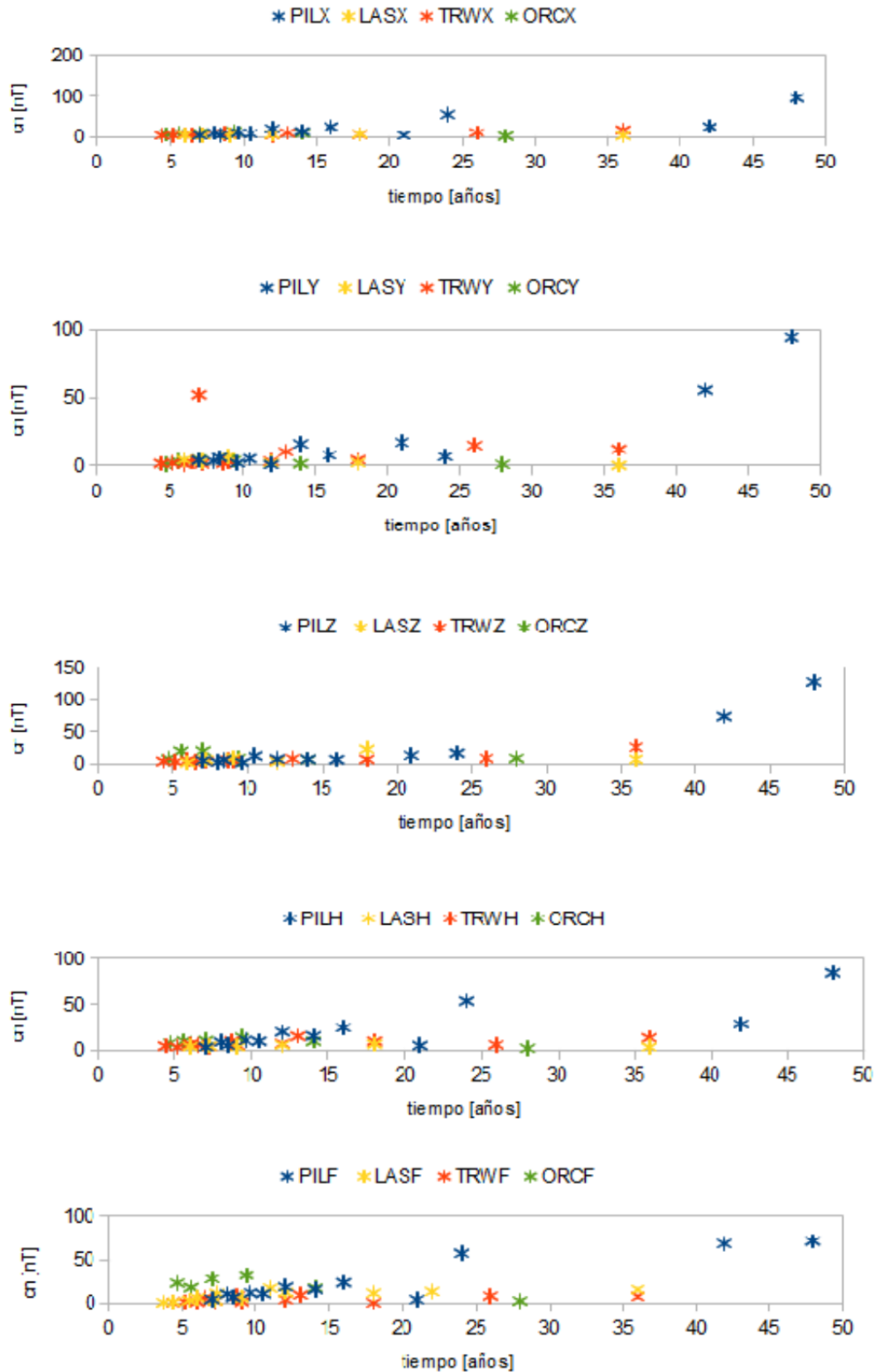


FIG. 8: Coeficientes del desarrollo de Fourier (en nT) calculadas para las componentes X, Y, Z, H, F en las estaciones PIL, LAS, TRW y ORC en función de los períodos

Se debe considerar a la SV compuesta por la derivada temporal de las expresiones de los polinomios de ajuste de las series de promedios anuales y los residuos filtrados, por lo que se las identifica en lo que resta de este trabajo como SV del tipo 1 y SV del tipo 2, respectivamente. Ya que los los polinomios de ajuste de los VPA son en su mayo-

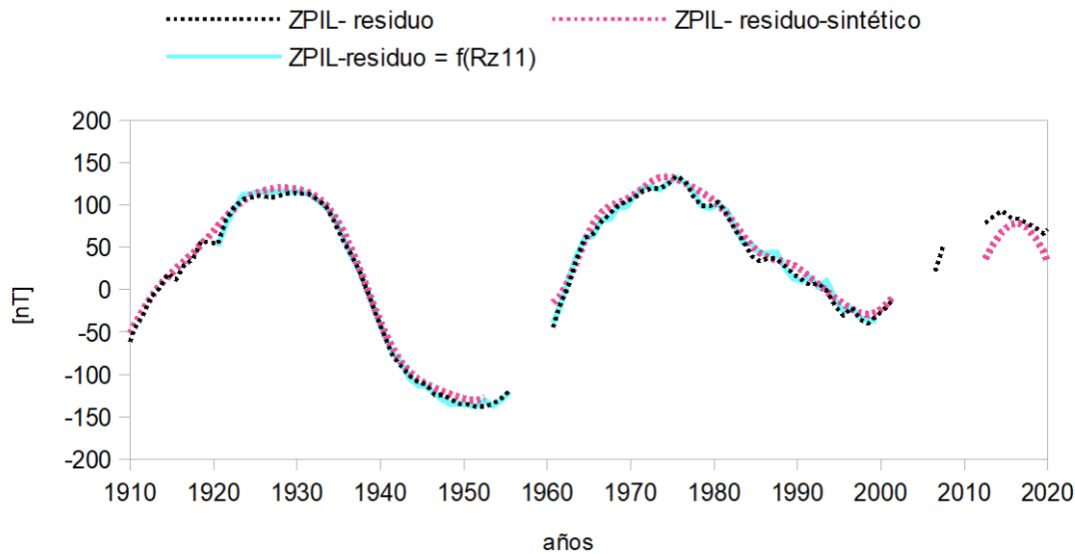


FIG. 9: Residuos de los valores promedios anuales de la componente Z en línea en línea a trazos negra, su residuo sintético en línea a trazos color magenta y valor residual obtenido mediante el estudio con ventana móvil Rz11 en línea continua color cian.

ría polinomios de segundo grado, las expresiones de la SV de tipo 1 de las distintas componentes quedan expresadas por medio de rectas, excepto para los datos de las distintas componentes registradas en ORC donde la SV de tipo 1 son polinomios de segundo grado. A continuación se presenta un gráfico de las SV de tipo 2 para las componentes al este en las cuatro estaciones, a modo de ejemplo, ver Fig. 10.

TABLA 4a: Coeficientes de correlación para los VPA filtrados para la estación PIL

PIL	Coef corr con Dst	Coef corr con dDst/dt
SVX	-0,2	0,29
SVY	-0,01	0,14
SVZ	-0,22	0,37
SVH	-0,16	0,23
SVF	-0,17	0,02

TABLA 4b: Coeficientes de correlación para los VPA filtrados para la estación LAS

LAS	Coef corr con Dst	Coef corr con dDst/dt
SVX	-0,05	-0,09
SVY	0,01	0,02
SVZ	0,07	0,11
SVH	-0,06	-0,06
SVF	-0,15	-0,14

Impulsos seculares o Jerks geomagnéticos

Los impulsos repentinos en la SV son un cambio de comportamiento que es postulado como debido a interacciones entre el manto y el núcleo externo. En particular pueden identificarse en la SV por tener forma de V o de V invertida [45]. Estos impulsos no se observan en todas las componentes en todas las estaciones o al mismo tiempo. Para los últimos veinte años, donde tanto los instrumentos como las

TABLA 4c: Coeficientes de correlación para los VPA filtrados para la estación TRW

TRW	Coef corr con Dst	Coef corr con dDst/dt
SVX	0,01	0,19
SVY	0,06	0,06
SVZ	-0,32	0,34
SVH	0,04	0,15
SVF	0,11	0,01

metodologías de medición han sido comparables y estandarizadas por la red Intermagnet, pueden esperarse resultados interesantes. Se encuentran evidencias de la posibilidad de identificación de un impulso en 1938 ORCSVY (ver Fig. 11). Este podría representar al identificado para 1932. Debido al retardo que se experimenta en el hemisferio sur [12], éste no podría identificarse como el impulso de 1938.

Con la metodología utilizada en el presente trabajo también se pudieron identificar los impulsos correspondientes a PILSVY (1973), TRWSVX (1988) y TRWSVZ (1988) (ver Figs. 12 (a-c)) estos impulsos también fueron descriptos por Pinheiro et al. (2011) [24].

Por otra parte, para el impulso de 2014 se encuentra una posible identificación en TRWSVF en 2016 (ver Fig. 13). Finalmente, el impulso de 2017 detectado con los datos satelitales de SWARM, descripto en el trabajo publicado por Brown et al. [45] (2019) pudiera ser identificado en los datos de PILSVY en 2019 (ver Fig. 14).

Recientemente, según un trabajo publicado en agosto de 2021, hay evidencias de un posible impulso en 2019-2020 a partir de los datos de SWARM [46]. Para poder observarlo en las estaciones del Hemisferio Sur habrá que esperar al menos hasta fines de 2022.

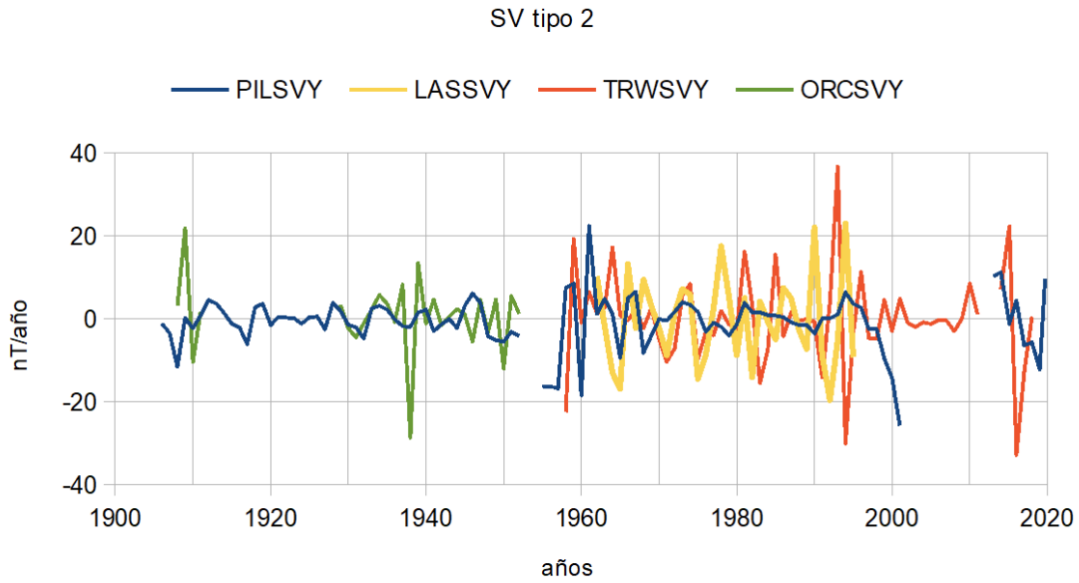


FIG. 10: Variación secular de tipo 2 para la componente Y en las distintas estaciones de la ROMP.

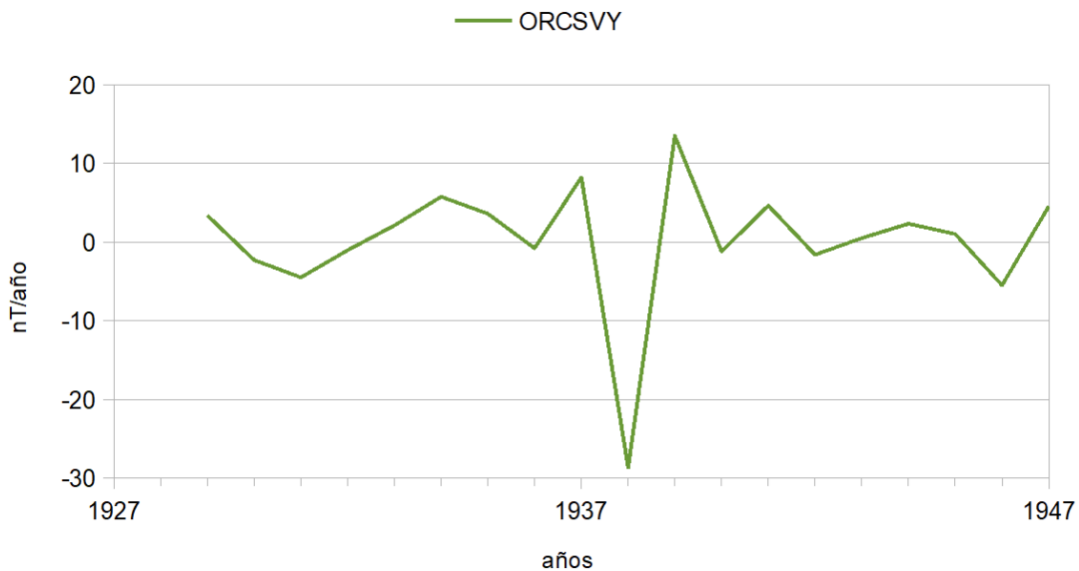


FIG. 11: Posible identificación de un impulso en 1938 - ORCSVY

IV. CONCLUSIONES

Los datos de las estaciones de la ROMP han sido medidos con distintos tipos de instrumentos a lo largo del tiempo, para los últimos veinte años, donde tanto los instrumentos como las metodologías de medición han sido comparables y estandarizadas por la red Intermagnet, pueden verse resultados interesantes. Se procedió al ajuste de las series de datos mediante polinomios de hasta orden tres, encontrando que en general la tendencia secular es parabólica.

La influencia solar se encuentra presente en la serie de los promedios anuales (ciclo solar, doble y cuatro veces el mismo) hallado mediante el análisis armónico de los residuos de los valores medios anuales de las componentes. Con el fin de estudiar la variación secular y los impulsos, se utiliza-

ron los residuos filtrados. Se pudo observar que los residuos obtenidos mediante el método de ventana móvil Rz11 son comparables a los filtrados.

Por otra parte se analizó la posible influencia de los campos de origen externo en los promedios anuales filtrados mediante un estudio con el índice Dst y su derivada temporal.

Se encontraron evidencias de la posibilidad de identificación de un impulso en 1938 en ORCSVY. Así mismo, para el impulso de 2014 se presenta una señal candidata en TRWSVF en 2016. Finalmente, el impulso de 2017 descrito por los datos satelitales de SWARM pudiera ser identificado en los datos de PILSVY en 2019.

La propuesta a futuro consiste en continuar con este es-



FIG. 12: (a) Identificación de un impulso en 1973 - PILSVY; (b) Identificación de un impulso en 1988 - TRWSVX y (c) Identificación de un impulso en 1988 - TRWSVZ.

tudio, esperando la posible detección del impulso de 2019-2020 en los registros de las estaciones de la ROMP.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al del British Geological Survey <http://www.geomag.bgs.ac.uk> que mantiene disponible los promedios anuales de las componentes calculadas en distintos observatorios geomagnéticos del mundo; asimismo se agradece a los colaboradores de la red Intermagnet <https://www.intermagnet.org>.

[intermagnet.org](https://www.intermagnet.org).

Se agradece en particular, al personal que mantiene en funcionamiento a las estaciones PIL, LAS; TRW y ORC. Se agradece a los colaboradores del Observatorio Real de Bélgica <http://sidc.be/silso> que mantienen disponible el número de manchas solares R, que es utilizado en este trabajo.

Los resultados presentados aquí se basan en el índice Dst, calculado y puesto a disposición por el World Data Center

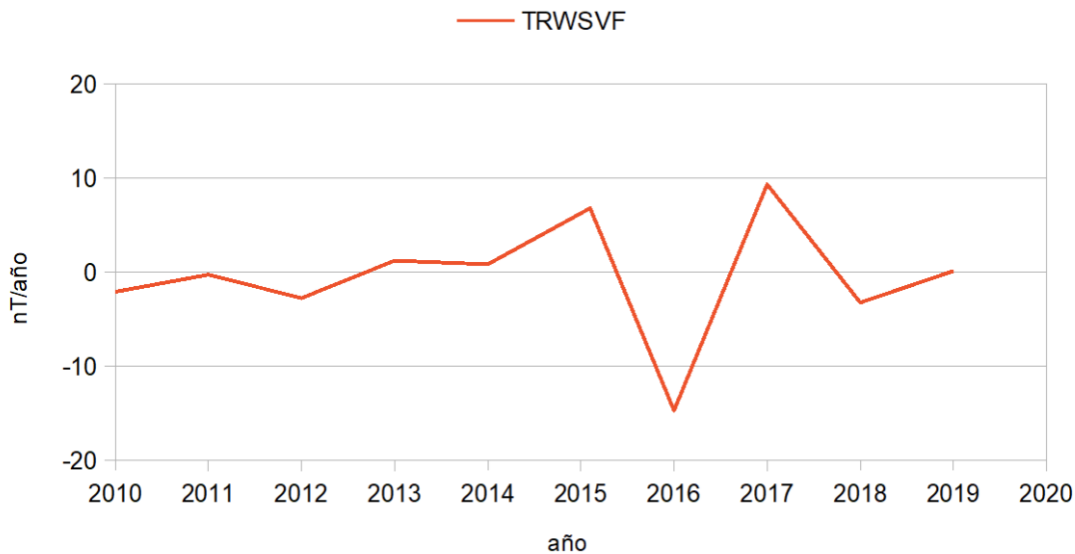


FIG. 13: Posible identificación del impulso de 2014 en 2016 - TRWSVF.

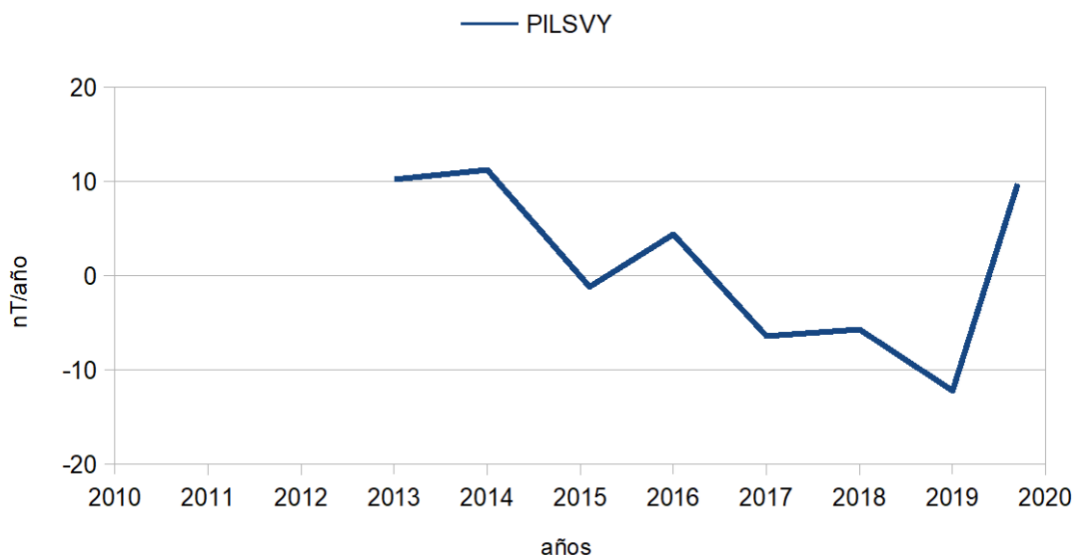


FIG. 14: Posible identificación del impulso de 2017 en 2019- PILSVY.

for Geomagnetism, Kyoto a partir de datos recopilados en observatorios magnéticos.

Se agradece a los institutos nacionales involucrados y al ISGI (<http://isgi.unistra.fr/>).

REFERENCIAS

- [1] W. D. Parkinson. *Introduction to geomagnetism* (Scottish Academic Press Ltd., Edimburgo, 1983).
- [2] R. Lanza y A. Meloni. *The Earth's Magnetic Field* (Springer, 2006).
- [3] E. Thébaud, M. Purucker, K. A. Whaler, B. Langlais y T. J. Sabaka. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Science Reviews* **155**, 95-127 (2010).
- [4] L. Ballani, J. M. Hagedoorn, I. Wardinski, D. Stromeyer y H. Greiner-Mai. The 1991 geomagnetic jerk as seen at the Earth's surface and the core-mantle boundary: Jerk 1991. *Geophysical Journal International* **183**, 659-680 (2010).
- [5] G. A. Cox, W. J. Brown, L. Billingham y R. Holme. MagPySV: A Python Package for Processing and Denoising Geomagnetic Observatory Data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **19**, 3347-3363 (2018).
- [6] W. Brown, J. Mound y P. Livermore. Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **223**, 62-76 (2013).
- [7] S. R. C. Malin y B. M. Hodder. Was the 1970 geomagnetic jerk of internal or external origin? *Nature* **296**, 726-728 (1982).

- [8] L. R. Allredge. A discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **89**, 4403-4412 (1984).
- [9] M. Alexandrescu, D. Gibert, G. Hulot, J.-L. Le Mouél y G. Saracco. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **101**, 21975-21994 (1996).
- [10] M. Le Huy, M. Alexandrescu, G. Hulot y J.-L. Le Mouél. On the characteristics of successive geomagnetic jerks. *Earth, Planets and Space* **50**, 723-732 (2014).
- [11] P. B. Kotzé. The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories. *Earth, Planets and Space* **69** (2017).
- [12] P. DEMICHELIS y R. TOZZI. A Local Intermittency Measure (LIM) approach to the detection of geomagnetic jerks. *Earth and Planetary Science Letters* **235**, 261-272 (2005).
- [13] S. K. Bhardwaj y P. B. V. Subba Rao. Secular trend of geomagnetic elements in the Indian region. *Earth, Planets and Space* **65**, 1515-1523 (2013).
- [14] J. M. Torta, F. J. Pavón-Carrasco, S. Marsal y C. C. Finlay. Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014. *Geophysical Research Letters* **42**, 7933-7940 (2015).
- [15] K. J. Pinheiro y J. M. Travassos. Impulses of the geomagnetic secular variation (jerks) at vassouras magnetic observatory detected by wavelet analysis. *Revista Brasileira de Geofísica* **28** (2010).
- [16] K. Pinheiro y A. Jackson. Can a 1-D mantle electrical conductivity model generate magnetic jerk differential time delays? *Geophysical Journal International* **173**, 781-792 (2008).
- [17] L. Mataruna y V. M. Hamza. Relation between different delay times of geomagnetic jerks and lateral variations in mantle heat flow. *International Journal of Geophysics and Geochemistry* **3**, 14-24 (2016).
- [18] L. Silva y G. Hulot. Investigating the 2003 geomagnetic jerk by simultaneous inversion of the secular variation and acceleration for both the core flow and its acceleration. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **198-199**, 28-50 (2012).
- [19] E. Qamili, A. De Santis, A. Isac, M. Manda, B. Duka y A. Simonyan. Geomagnetic jerks as chaotic fluctuations of the Earth's magnetic field. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **14**, 839-850 (2013).
- [20] J. Aubert y C. C. Finlay. Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface. *Nature Geoscience* **12**, 393-398 (2019).
- [21] J. Gianibelli, I. R. Cabassi y O. Sidoti. *Expresión de la variación secular en el observatorio geomagnético de "Las Acacias", Prov. de Buenos Aires en Actas de la 2da Jornada Geológica Bonarense 1988* (Bahía Blanca, 1988), 475-480.
- [22] J. Gianibelli e I. Cabassi. Secular variation modeling at Trelew Magnetic Observatory (Chubut, Argentina). *Contributions to Geophysics and Geodesy* **31**, 1 (2001).
- [23] J. Gianibelli. *La variación secular de los observatorios magnéticos de Islas Argentinas, Orcadas, Trelew y Pilar en Actas Del VI Simposio Argentino y III Latinoamericano Sobre Investigaciones Antárticas - VI Argentine And Latin-American Symposium On Antarctic Research Dirección Nacional Del Antártico / Instituto Antártico Argentino* (2007).
- [24] K. J. Pinheiro, A. Jackson y C. C. Finlay. Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991, and 1999 geomagnetic jerks: MEASUREMENTS AND UNCERTAINTIES OF JERKS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **12** (2011).
- [25] E. R. Priest. *Solar magnetohydrodynamics* (Springer Science & Business Media, 2012).
- [26] I. G. Usoskin, M. Schüssler, S. K. Solanki y K. Mursula. Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **110** (2005).
- [27] J. J. Love, K. Mursula, V. C. Tsai y D. M. Perkins. Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant?: SUNSPOTS, GEOMAGNETISM, AND TEMPERATURE. *Geophysical Research Letters* **38**, n/a-n/a (2011).
- [28] J. M. Guevara Díaz. Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra. Nueva Etapa* **XXX**, 79-102 (2014).
- [29] M. Manda, R. Holme, A. Pais, K. Pinheiro, A. Jackson y G. Verbanac. Geomagnetic Jerks: Rapid Core Field Variations and Core Dynamics. *Space Science Reviews* **155**, 147-175 (2010).
- [30] C. Demetrescu y V. Dobrica. Multi-decadal ingredients of the secular variation of the geomagnetic field. Insights from long time series of observatory data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **231**, 39-55 (2014).
- [31] V. Dobrica, C. Demetrescu y C. Stefan. Toward a better representation of the secular variation. Case study: The European network of geomagnetic observatories. *Earth, Planets and Space* **65**, 767-779 (2013).
- [32] V. Dobrica, C. Demetrescu y M. Manda. Geomagnetic field declination: from decadal to centennial scales. *Solid Earth* **9**, 491-503 (2018).
- [33] C. C. Finlay, V. Lesur, E. Thébaud, F. Vervelidou, A. Morschhauser y R. Shore. Challenges Handling Magnetospheric and Ionospheric Signals in Internal Geomagnetic Field Modelling. *Space Science Reviews* **206**, 157-189 (2016).
- [34] N. Gillet, D. Jault, E. Canet y A. Fournier. Fast torsional waves and strong magnetic field within the Earth's core. *Nature* **465**, 74-77 (2010).
- [35] N. Gillet, D. Jault y C. C. Finlay. Planetary gyre, time-dependent eddies, torsional waves, and equatorial jets at the Earth's core surface. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **120**, 3991-4013 (2015).
- [36] R. Holme y O. de Viron. Characterization and implications of intradecadal variations in length of day. *Nature* **499**, 202-204 (2013).
- [37] K. Whaler, N. Olsen y C. Finlay. Decadal variability in core surface flows deduced from geomagnetic observatory monthly means. *Geophysical Journal International* **207**, 228-243 (2016).
- [38] M. C. Metman, P. W. Livermore, J. E. Mound y C. D. Beggan. Modelling decadal secular variation with only magnetic diffusion. *Geophysical Journal International* **219**, S58-S82 (2019).
- [39] J. Aubert y C. C. Finlay. Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface. *Nature Geoscience* **12**, 393-398 (2019).

- [40] K. A. Whaler, M. D. Hammer, C. C. Finlay y N. Olsen. Core Surface Flow Changes Associated With the 2017 Pacific Geomagnetic Jerk. [Geophysical Research Letters](#) **49** (2022).
- [41] I. Wardinski. *Core surface flow models from decadal and subdecadal secular variation of the main geomagnetic field* en (GFZ, Helmholtz-Zentrum, 2005).
- [42] B. Zossi, H. Amit, M. Fagre y A. G. Elias. Observed Auroral Ovals Secular Variation Inferred from Auroral Boundary Data. [Geosciences](#) **11**, 351 (2021).
- [43] S. Maus y P. Weidelt. Separating the magnetospheric disturbance magnetic field into external and transient internal contributions using a 1D conductivity model of the Earth. [Geophysical Research Letters](#) **31** (2004).
- [44] S.-I. Akasofu. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. [Space Science Reviews](#) **28** (1981).
- [45] W. Brown, C. Beggan y S. Macmillan. *Geomagnetic jerks in the SWARM-era* en *Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held 9-13 May 2016 in Prague, Czech Republic*. (ed. Ouwehand., L.) (2016), 274.
- [46] F. J. Pavón-Carrasco, S. Marsal, S. A. Campuzano y J. M. Torta. Signs of a new geomagnetic jerk between 2019 and 2020 from Swarm and observatory data. [Earth, Planets and Space](#) **73** (2021).