



Foto: R. Merlino.

Boletín mensual de la Estación magnética de Cipolletti

SEPTIEMBRE 2023

LA ESTACION

La estación magnética de la ciudad de Cipolletti fue instalada a fines de 2015 dentro del predio de la estación meteorológica con el fin de monitorear la intensidad total del Campo Magnético Terrestre en una región precordillerana. Los datos obtenidos en este punto geográfico son de gran interés geomagnético tanto para estudios científicos como para aplicaciones industriales de prospección de recursos naturales, abundantes en la zona. Por lo que, estos registros aportan información de gran relevancia al conocimiento del comportamiento y evolución del campo a nivel local, regional y global, mejorando el modelado del campo a distintas escalas.

Autores: María Inés Gil, Juan Carlos Gil, Milton Soria, Julieta Moyano, María Laura Cariaga.

Coord. Área Geofísica: Geof. Camila Farías
cfarias@smn.gov.ar

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

UBICACIÓN

La Estación Magnética Cipolletti se encuentra en la ciudad homónima de la provincia de Río Negro. Sus coordenadas corresponden:

- Coordenadas Geográficas: 38,941°S; 67,978°W
- Altura sobre el nivel del mar: 265 m.



Figura 1: Ubicación de la Estación Cipolletti

FUNDAMENTOS

La instalación de la estación magnética permanente de Cipolletti permite conocer la evolución espacio-temporal de la intensidad total F del CMT en sitios de interés geomagnético, de esta manera se podría contribuir con la confección del Modelo Internacional de Campo Geomagnético de Referencia (IGRF)

El SMN cuenta con predios accesibles como lo son las estaciones meteorológicas, en donde este tipo de estaciones magnéticas se pueden instalar de manera rápida y sencilla, Cipolletti es la primera y ha demostrado ser de fácil manejo.

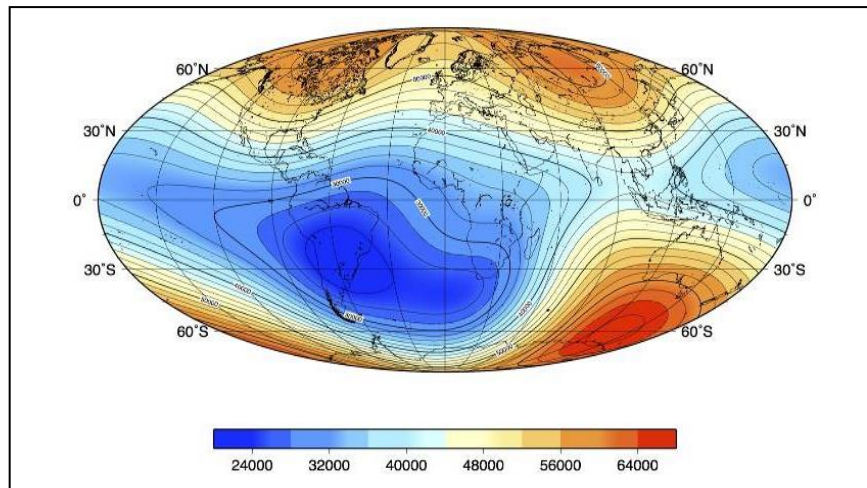


Figura 2: Modelo del CMT del IGRF

SELECCIÓN DEL SITIO

Particularmente, Cipolletti se localiza en un sitio de interés geomagnético y geológico, en una zona precordillerana donde la explotación de recursos naturales, como el gas, petróleo y minerales, es la actividad económica principal de la región. Por lo tanto, el registro obtenido es de fundamental importancia en los estudios de prospección de las industrias de petroleras y/o mineras.

El instrumental se localizó en un principio en un lugar (*Sitio 1*) protegido del viento y del sol, cuyas coordenadas son $38^{\circ}56,45'S$, $67^{\circ}58,7'W$. Desde el momento en que se instaló, se comenzaron a registrar valores de referencia del Campo Magnético Terrestre. Por el transcurso de casi un año, en conjunto con el área de Geomagnetismo de la UNLP, los datos obtenidos fueron validados con registros del Observatorio Geomagnético de Trelew, por ser el más cercano a la estación. Los resultados arrojaron que el lugar era el adecuado para el registro de Intensidad del CMT (F).

Luego de dos años de funcionamiento se realizó un nuevo relevamiento magnético del sitio para ubicar la casilla construida especialmente para albergar el instrumento en su interior y protegerlo de los eventos meteorológicos locales, sobre todo de los vientos patagónicos fuertes y las tormentas que inundan el predio. La misma fue construida en su totalidad con materiales no ferromagnéticos, y la mano de obra fue llevada a cabo en colaboración mutua por: Rodolfo Merlino, jefe de la estación meteorológica Cipolletti, Denis Martínez, presidente de la Fundación de Astrónomos Aficionados del Hemisferio Sur, y, María Inés Gil, geóloga encargada de la Estación Magnética Cipolletti.

Por lo tanto, el instrumento fue movido 13 m al S y 4 m al E (*Sitio 2*) desde su posición original, dando también buenos resultados en el registro magnético y mostrando una diferencia de aproximadamente 30 nT con respecto a la posición inicial (Figura 6). Esta diferencia aun es motivo de estudio ya que la misma nos permitirá corregir todos los datos obtenidos desde la instalación de la estación a un único sitio de medición.

INSTRUMENTAL

La intensidad total F del CMT en ésta Estación se registra con un Magnetómetro de Precesión Protónica, marca Geometrics, modelo G856; cedido por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de la Plata.

El registro del CMT durante más de cien años fue desarrollado con instrumental analógico clásico. En la actualidad, dicho equipamiento está siendo reemplazado por instrumental digital que facilita y mejora la calidad de registro de las componentes del campo magnético terrestre.



Figura 3: Magnetómetro de Precesión Protónica, Marca Geometrics, Modelo G856

OBSERVATORIO MAGNÉTICO OPERATIVO

A partir de enero 2020, por sugerencia de la IAGA, la sigla adoptada para la Estación es CIP. Se tiene en forma permanente un magnetómetro de precesión protónica, para el registro de F del CMT. Se trata de un Magnetómetro Geometrics G856, con administración de energía externa. Las baterías utilizadas no afectan el registro magnético, las mismas son de gel, de 12v/7A o 12v/12A, y poseen una autonomía de 2 a 3 semanas aproximadamente.

El registro óptimo del sistema es cada 5 minutos a diferencia del sistema INDIGO de los Observatorios de Pilar y Orcadas que manejan intervalos de medición de 1 minuto. Los datos son almacenados en la memoria del equipo, mientras tenga energía. Por lo que, cada 10-14 días aproximadamente, la serie de datos es descargada a una computadora y la batería intercambiada.

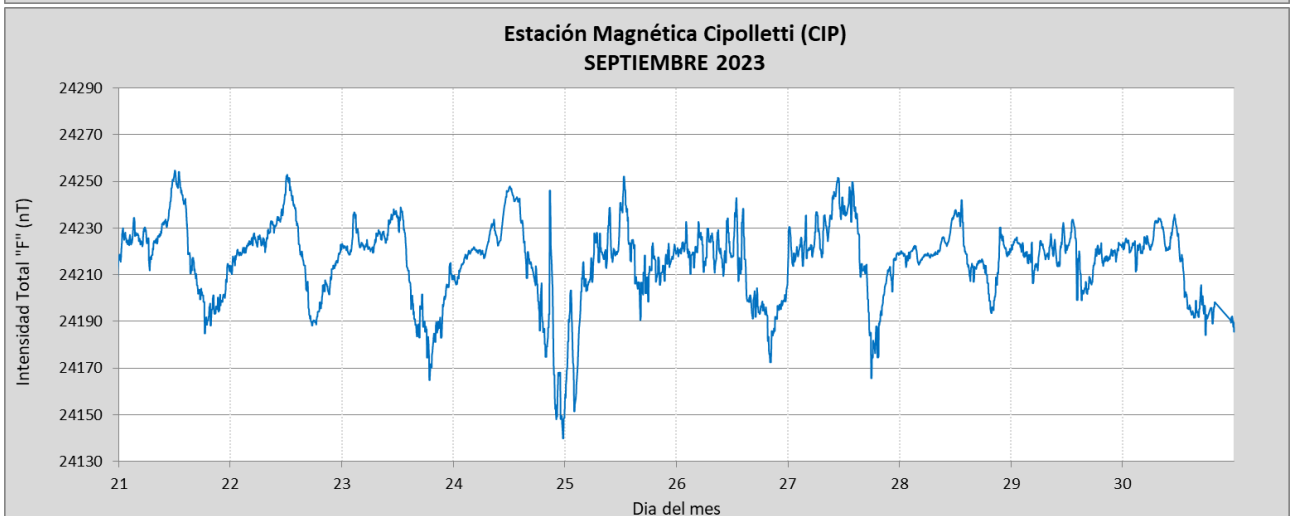
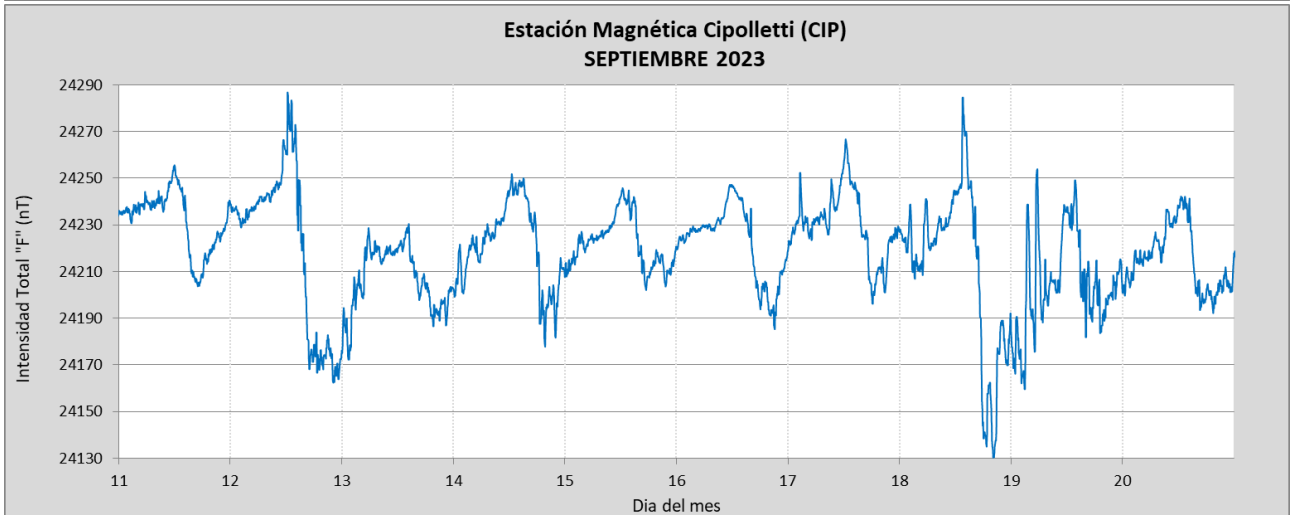
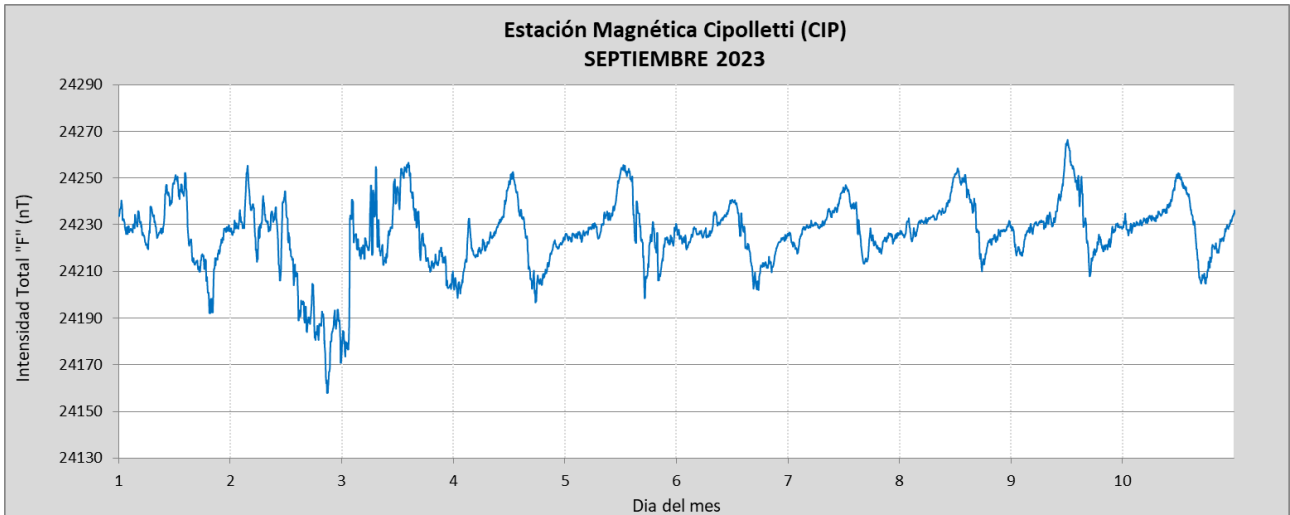
En gabinete los datos son procesados en una planilla Excel y validados constantemente con los registros de F de la red de Observatorios del país. Se obtienen promedios horarios, mensuales, y anuales. Luego se calculan, utilizando los días calmos establecidos por la IAGA, las curvas de variación diurna para cada mes de registro, y se comparan estos resultados con un índice de actividad geomagnética local, en formatos horarios, trihorarios o diarios.



Figura 4: Casilla Geomagnética de la Estación CIP

REGISTROS

Se presentan los registros absolutos de F que pudieron obtenerse durante el mes de Septiembre de 2023. Se muestra también la variación de F según los promedios mensuales desde Noviembre 2015 hasta la actualidad. Los datos faltantes se deben a inconvenientes en la electrónica del instrumento.



Figuras 5 (a,b,c): Intensidad total del campo magnético en función del tiempo

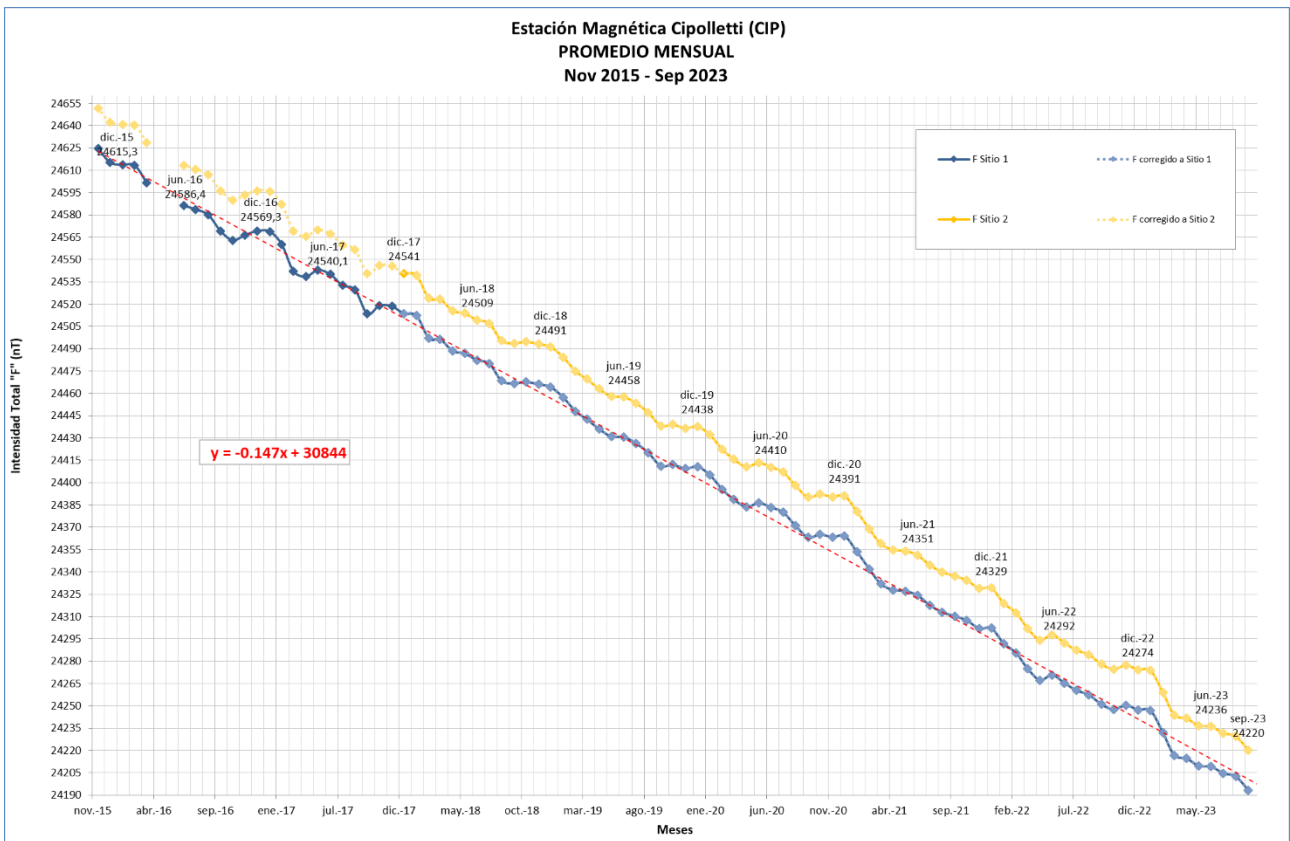


Figura 6: Variación mensual de la Intensidad total del campo magnético.

VARIACIÓN DIURNA CALMA Y PERTURBADA

El campo geomagnético es cambiante en escalas desde los milisegundos a millones de años. Las escalas temporales más reducidas vienen dadas a partir de los flujos en la ionosfera y la magnetosfera; alguno de estos cambios puede corresponder a tormentas geomagnéticas o variaciones diarias en las corrientes. Las variaciones que tienen origen externo pueden clasificarse en regulares e irregulares. Las primeras, se asocian al ciclo diario, al lunar y las de periodo largo con el ciclo solar (cada 11 años). La variación Lunar (L), se debe a la influencia gravitacional que ejerce la luna sobre la ionosfera, sin embargo, es considerablemente mayor la influencia del sol. La variación Diurna (Sq), está directamente relacionada con la incidencia de la radiación solar en la ionósfera, donde el gas atmosférico que lo constituye, se encuentra parcialmente ionizado, razón por la que el horario de nocturnidad es siempre más tranquilo y menos perturbado. El movimiento y la interacción de este flujo de iones crean un sistema de corrientes eléctricas, el cual se detecta en la superficie de la Tierra como una variación suave en las componentes del campo magnético. Por su parte, las variaciones irregulares son consecuencia de un proceso dinámico de interacción entre plasma (viento solar), compuesto de partículas cargadas (protones y electrones) con el campo magnético de la Tierra.

La Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) clasifica mensualmente los días más calmos o Q days (Quiet Days) y los días más perturbados del mes o D Days (Disturbed Days) basándose en el Índice de perturbación geomagnética K. Es muy difícil establecer con certeza la perturbación presente aún en días aparentemente calmos. Es sabido que la clasificación de la IAGA es relativa, porque incluso en días de calma excepcional se pueden encontrar perturbaciones residuales que causan cierta variación, sin embargo, esta clasificación brinda una aproximación.

Para conocer la variación diaria calma del mes, consideramos los cinco días más calmos (Q1 a Q5) publicados por la IAGA. Mientras que, para conocer la variación perturbada del mes, basta con considerar al día más perturbado del mes (D1), dado también por la IAGA.

Los cinco días más calmos para este mes fueron el 10, 7, 11, 28k, 8 y el más perturbado, el 19. Debido a que algunos de estos días no contaban con un registro diario completo, se procedió a reemplazar esos días por los siguientes días menos perturbados (Q6 a Q10: 16k, 4, 6k, 15k, 9a) que también clasifica la IAGA, y para el caso de los más perturbados en orden decreciente D2 a D5 (2, 18, 26, 25). Las notas k y * significan que los días no son completamente quietos o perturbados, respectivamente.

En la siguiente tabla, según el registro diario se encuentre completo, se presentan los cinco días más calmos del mes, el día más perturbado y sus respectivos valores del Nivel de Referencia Nocturno (NRN), el cual no es más que el promedio de F entre las 03:00 y 06:59 UTC (00 a 03:59 HOA), horario de menor perturbación.

	Quietest Days					Most Disturbed Days
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	D1
Día	10	7	11	28k	8	19
NRN	24231,8	24229,3	24238,2	24218,2	24230,6	24208,0

A continuación, se presentan los gráficos que llamaremos de variación diaria calma (VDQ) y de variación diaria perturbada (VDD) del mes a partir de los datos provisionales, por lo que son una aproximación de la variación mensual del Campo Magnético dada por las variaciones de las corrientes eléctricas que ocurren durante el día.

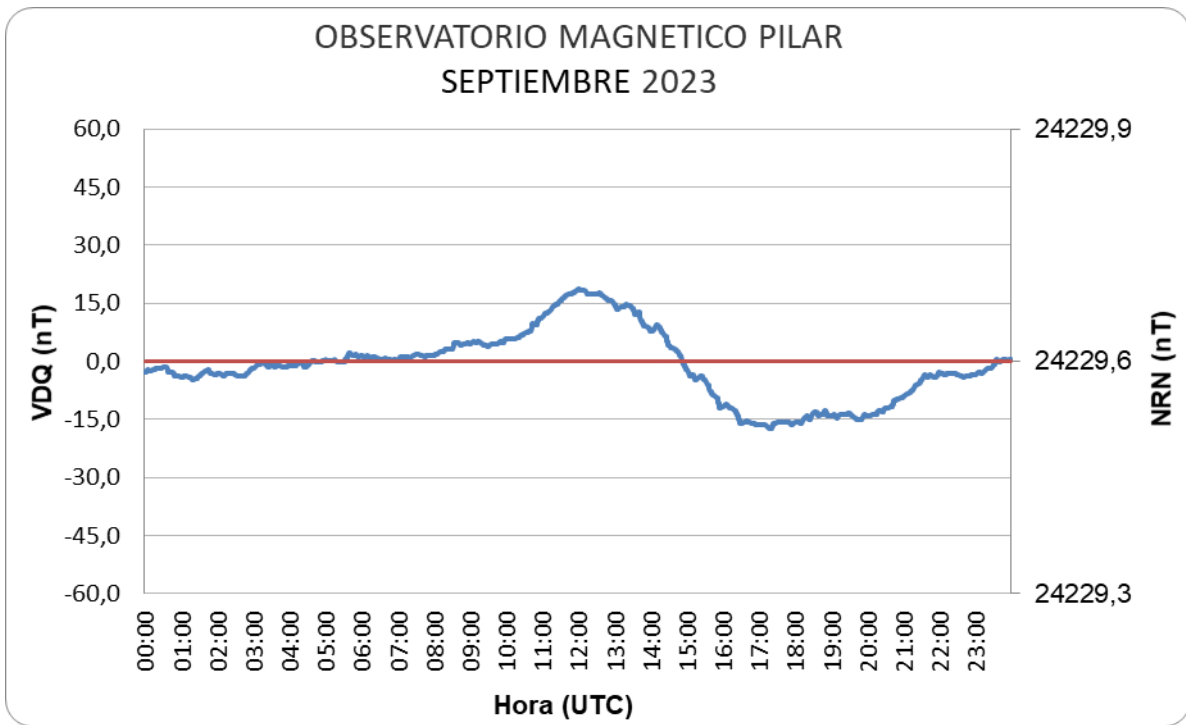


Figura 7: Variación Diaria Calma del mes de agosto

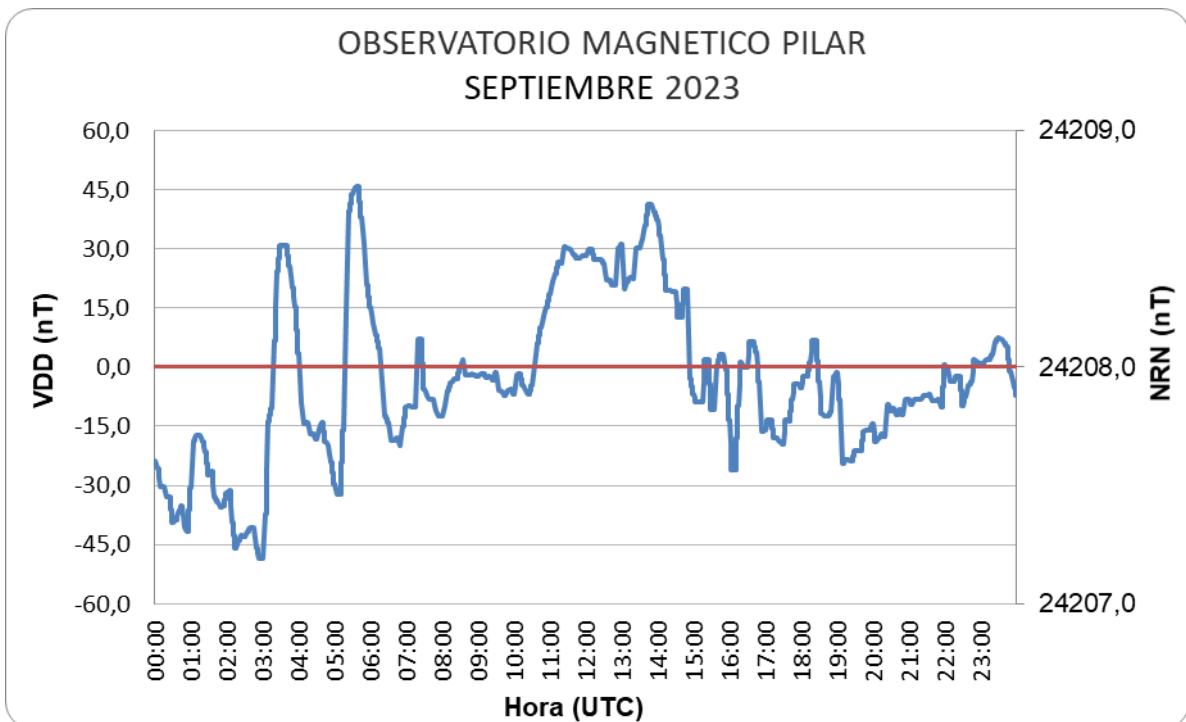


Figura 8: Variación Diaria Perturbada del mes de agosto

COMENTARIOS FINALES

La actividad solar se corresponde con el momento del ciclo solar al que nos vamos acercando, al máximo de su ciclo. Durante el mes de septiembre se presentaron varios eventos de distintos tipos e intensidades, expulsando por lo general llamaradas solares con CME asociadas que en algunos casos fueron eyectadas con componentes en dirección a la Tierra. Asimismo a esos eventos se le sumaron las condiciones del incremento de la velocidad del viento solar debido al escape del mismo proveniente de agujeros coronales.

Todos esos eventos presentes perturbaron el campo magnético terrestre en mayor o menor intensidad. Estas perturbaciones se vieron registradas por los instrumentos instalados en la estación y observatorios del SMN. La tormenta geomagnética más intensa se presentó el día 19, alcanzando, según la NOAA, niveles de tormenta severa G3. Días anteriores, 11-12 los niveles de tormenta alcanzados fueron moderados G2. Así como al comienzo del mes donde el día 2 también se alcanzaron esos niveles, precedidos por niveles de tormenta menor G1. Para finalizar el mes, los días 25-26, mostraron también niveles de tormenta G1. En todos los casos, la llegada de una CME o parte de ella, influyo en la perturbación del CMT. Todo lo antedicho, puede ser fácilmente reconocible en los registros de la intensidad total del CMT de la estación.

Asimismo, el resto de los días, aunque no alcanzaron niveles de actividad geomagnética clasificados como tormenta, también se presentaron activos. Esto último se refleja en la definición de la IAGA de los días más quietos del mes, donde fueron pocos los días definidos como completamente quietos. De todas formas la curva quieta VDQ de septiembre pudo ser calculada y su opuesta VDD también para poder compararlas y mostrar las diferencias de actividad de cada una. La VDQ posee una amplitud de 30 nT aproximadamente y una forma regular y suave, mientras que la VDD se presenta muy irregular y con una amplitud del triple del tamaño que la anterior. Vale aclarar que el día mas perturbado del mes coincide con el día en que se produce la tormenta severa G3.

Las condiciones del viento solar (velocidad, densidad de protones, temperatura) durante el mes de Agosto pueden verse en el siguiente link:

<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/#/vis/summary/1m/1693537200000>

Los boletines de meses anteriores pueden visualizarse en:

<http://repositorio.smn.gob.ar/>

Para mayor información sobre lo abordado, consultar el Anexo de conceptos teóricos que se muestra a continuación, al finalizar el boletín mensual.

ANEXO: CAMPO MAGNETICO TERRESTRE. CONCEPTOS TEORICOS.

El **campo magnético** terrestre se parece al campo de una larga barra magnética o al de una esfera uniformemente magnetizada. El origen de este campo no es bien conocido, pero se cree que es debido a las corrientes conectivas en un núcleo fluido conductor. En la superficie de la Tierra, el polo de la barra magnética equivalente, más cerca del Polo Norte Geográfico es el Polo Sur Magnético. Esta situación paradójica se da por la convención que define como Norte Magnético al extremo de una aguja imantada que apunta al Norte Geográfico. Entonces por la ley de atracción-repulsión de polos magnéticos, el Norte Geográfico debe necesariamente ser un polo sur magnético. Para evitar confusiones, el polo magnético cercano al Norte Geográfico es y será referido como Polo Norte Magnético, aunque será de intensidad negativa.

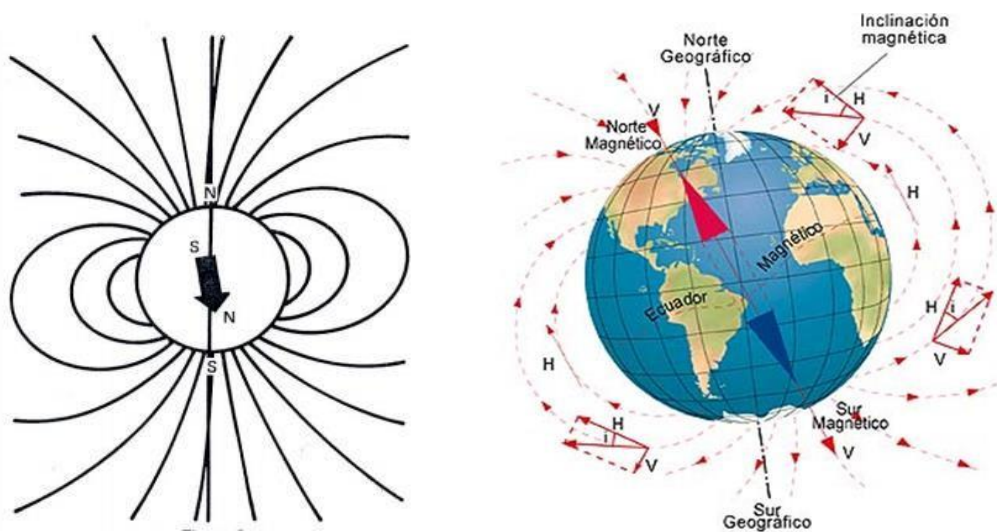


Fig 1

El campo o las líneas de flujo, siguen la trayectoria que muestra la Figura 1. Nótese que la dirección del campo es vertical en los polos magnéticos, y horizontal en el ecuador magnético. El entendimiento de esta geometría es importante para la interpretación de las anomalías magnéticas. La intensidad del campo, es una función de la cantidad de líneas por unidad de área. La intensidad en la región polar es aproximadamente el doble que en la ecuatorial, oscilando entre los 60.000 y 30.000 gammas o nanoteslas (nT). El Gauss es la unidad de la Inducción Magnética (B) y el Oersted de la Intensidad de Campo (H) en la nomenclatura física. Sin embargo, por convención en geofísica, el Gauss es la unidad de la intensidad magnética de campo en el sistema C.G.S. Numéricamente vale lo siguiente:

$$1\text{gamma} = 10^{-9} \text{ Tesla} = 1 \text{ nanoTesla} = 10^{-5} \text{ Gauss} = 10^{-5} \text{ Oersted} = 10^{-9} \text{ weber/m}^2$$

La intensidad del campo total de la Tierra no es perfectamente simétrica alrededor del polo geográfico. Además, el campo de la Tierra no puede ser representado exactamente como el de una simple barra magnética, puesto que en realidad hay numerosos polos de variación local o anomalías, debidas a desconocidas características del mecanismo generador del campo. También, el viento solar o flujo constante de partículas y corrientes eléctricas que llegan desde el sol, distorsionan las líneas de campo.

La anomalía más relevante, es la que se manifiesta en el núcleo de la Tierra y se registra en la superficie (Figura 2), pero también se encuentran anomalías en la corteza terrestre por las variaciones locales producidas fundamentalmente por los minerales magnéticos.

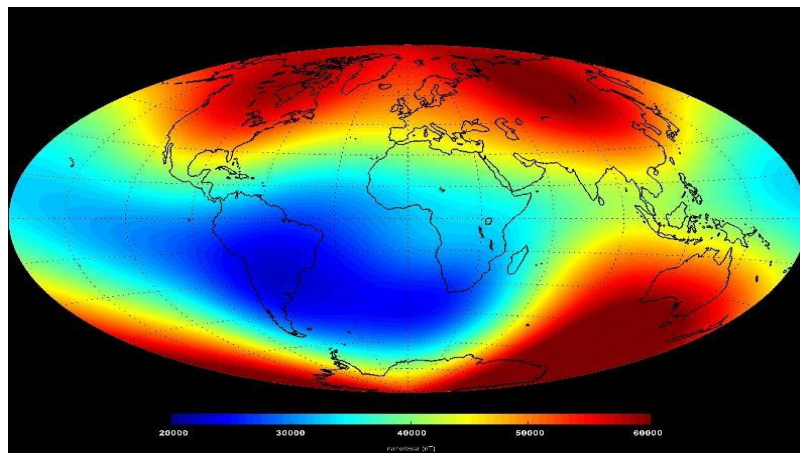


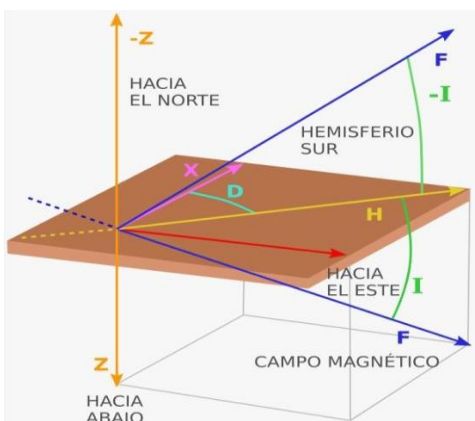
Fig. 2

Variaciones en el tiempo

Todas las variaciones descritas anteriormente se refieren a las *variaciones espaciales* del campo magnético terrestre, pero también existen las variaciones en el tiempo. Las más pequeñas, que van desde períodos de segundos, minutos y hasta horas, son el efecto directo o indirecto del viento solar y que distorsionan la magnetósfera o campo magnético externo de la Tierra. Las *variaciones diarias o diurnas* son notadas principalmente durante las horas de luz del día local. Estas variaciones no son predecibles, pueden significar cambios de hasta 100 gammas, y a menudo se las elimina de las mediciones. Superpuestas a estas variaciones diurnas, hay fenómenos de corto período llamado micropulsaciones que son más casuales en su comportamiento, generalmente más pequeñas en amplitud, y ocurren a cualquier hora, tanto del día como de la noche. Estas micropulsaciones ocurren en un rango de períodos desde los 0.01 segundos hasta varias decenas de minutos, con amplitudes de milésimos a decenas de gamma.

La variación de mayor importancia, fundamentalmente por ser una gran fuente de errores en las mediciones, son las tormentas magnéticas, que ocurren con una frecuencia de varias veces al mes, con un comienzo repentino y simultáneo en todo el mundo. Tales tormentas pueden exhibir variaciones de hasta varios cientos de gammas, y pueden durar desde uno hasta varios días. El campo interno o principal también cambia lentamente con los años, decenas y cientos de años, lo que ha venido a llamarse *variación secular*. La inclinación, intensidad y aún la ubicación de los polos magnéticos varían también, pero esto es solo de interés de los Observatorios.

Componentes Magnéticas



D, Declinación Magnética es la diferencia entre el norte geográfico y el norte magnético (el indicado por una brújula). En un punto dado de la Tierra, es el ángulo comprendido entre el norte magnético local y el norte geográfico.

F, es la intensidad magnética y es un vector. Su módulo está compuesto por la suma de las componentes cartesianas (X (N-S), Y (E-W), Z (Vertical)). X e Y están en el plano horizontal de N-S y E-O, respectivamente. Z en el plano vertical que será negativo hacia el Sur.

H, es la componente horizontal de **F**, en su proyección.

I es la Inclinación Magnética, es el ángulo medido sobre el plano vertical que contiene a **F** y **H**. Siendo negativo hacia el Sur.

Instrumentos

- Magnetómetro Protónico:

El magnetómetro de precesión protónica (ppm) es así llamado porque utiliza la precesión de los spines protónicos, o núcleo del átomo de hidrógeno en el caso de un hidrocarburo o agua, para medir la intensidad total del campo magnético terrestre. Los spines protónicos del agua, kerosén, alcohol, etc., se comportan como pequeños dipolos magnéticos. Estos dipolos son temporalmente alineados y polarizados mediante la aplicación de un campo magnético uniforme generado por una corriente en una bobina. Cuando se corta la corriente, el spin de los protones hace que estos precesen alrededor de la dirección del campo magnético de la Tierra. La precesión protónica genera entonces una pequeña señal en la misma bobina usada para la polarización, señal cuya frecuencia es proporcional a la intensidad del campo total e independiente de la dirección de la bobina. Figura 3 La constante de proporcionalidad es la conocida constante atómica o razón giromagnética del protón. La frecuencia de precesión, típicamente de 2.000 Hz para un campo terrestre de aproximadamente 50.000 gammas (nanoTeslas), se mide con un moderno contador digital, en valor absoluto de la intensidad de campo total y con una precisión de hasta 0,1 gamma (0,1 nT).



Limitaciones del magnetómetro protónico

El magnetómetro protónico no tiene partes móviles, tiene alta resolución en las mediciones y permite visualizar en forma digital las mediciones. Existen varias restricciones operacionales que pueden ser de interés bajo condiciones especiales de campo:

- 1) La señal de precesión protónica disminuye bruscamente en presencia de un fuerte gradiente de campo magnético (mayor de 600 gammas por metro).
- 2) La amplitud de la señal del sensor es del orden de los microvoltios y debe ser medida con una precisión de 0,04 Hz. Esta pequeña señal puede resultar difícil de medir en cercanía de corrientes eléctricas alternas. Por estas razones un magnetómetro protónico no puede operar próximo a edificios.

- Magnetómetro triaxial fluxgate:

Este tipo de magnetómetros permite el registro simultáneo de las tres componentes, declinación (D), las componentes, horizontal (H) y vertical (Z) del campo magnético de la Tierra. Las componentes del campo magnético se muestran cada 5 segundos y cada minuto con una resolución de 0,1 nT.

Un magnetómetro de saturación es un magnetómetro vector, lo que significa que mide no sólo la magnitud sino también la dirección del campo magnético de la Tierra. El dispositivo consta de dos núcleos ferromagnéticos rodeados por dos bobinas de alambre. Cuando el magnetómetro está activo, la corriente alterna pasa a través de una de las bobinas, conocida como la "bobina", creando campos magnéticos inducidos de diferentes intensidades. Los



cambios en los campos magnéticos generan una corriente eléctrica en la segunda bobina, conocida como la “bobina de detección”, que a continuación se puede medir.

La exposición a variaciones en el campo magnético de la Tierra provoca variaciones en los campos magnéticos de los núcleos, lo que conduce a cambios en la corriente en la bobina de detección. Esencialmente, el sensor de un magnetómetro de saturación consiste en un núcleo de un material ferromagnético de alta permeabilidad magnética, rodeado por un arrollamiento receptor. El campo magnético terrestre a lo largo del eje del núcleo produce en éste un flujo magnético.

Si se hace variar la permeabilidad del núcleo, variará su flujo, como consecuencia se inducirá un voltaje en el arrollamiento receptor que proporciona unas medidas del campo externo. El funcionamiento del magnetómetro está, por tanto, basado en la variación con el tiempo de la permeabilidad del núcleo. (Figura 4)

● Teodolito

El teodolito convencional es el instrumento utilizado para determinar posiciones midiendo dos ángulos, uno horizontal (azimut) y otro vertical (altura). Éste está construido en material antimagnético y por tanto se podría utilizar para medir la declinación, acoplándole una aguja magnética. De esta manera se obtendría valores absolutos de la Declinación e Inclinación magnética en un determinado espacio y tiempo. (Figura 5)



Fig. 5

DESCRIPCIÓN SISTEMA INDIGO

Este sistema proporciona el hardware y el software para operar un Observatorio Magnético Digital básico. El hardware consiste en un magnetómetro triaxial fluxgate (Fig 4), un magnetómetro protónico, un Digitizador (Fig 6), un receptor GPS para proporcionar un tiempo exacto, un registrador de memoria USB y una fuente de alimentación DC alimentada por batería.

El software INDIGO WATCH (Fig 7) captura los datos del magnetómetro digitalizado, registra en el disco y realiza el análisis de datos básicos. Los datos se registran cada 5 segundos del fluxgate y ppm, los mismos pueden ser monitoreados y almacenados en archivos diarios individuales usando el software INDIGO WATCH montado en cualquier PC. Se generan valores medios de las componentes medidas cada 1 minuto los cuales se registran en el USB Logger (Fig. 6).

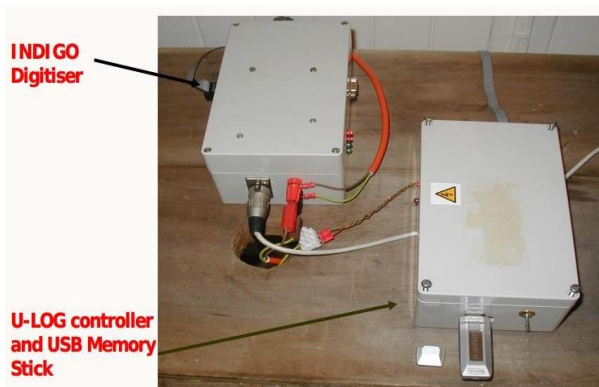


Fig. 6



Fig. 7

OBSERVATORIO MAGNÉTICO OPERATIVO

El Observatorio opera con Geomagnetic Data Acquisition System (GDAS) (Fig 8), el mismo fue desarrollado por la British Geological Survey (BGS). El INDIGO Watch registra las variaciones de las componentes del campo magnético, pero no los valores absolutos. El operador supervisa estas variaciones. Diariamente se realiza más de una observación absolutas por Operador. Éstas son mediciones con el Teodolito Magnético que porta un sensor Fluxgate en la parte superior del mismo. Con él se obtienen datos de Declinación e Inclinación. Las observaciones absolutas conjuntamente con los datos obtenidos por el Sistema Indigo, se procesan en el software (GDAS), y producen un registro continuo de los valores absolutos del campo magnético (Fig. 8).

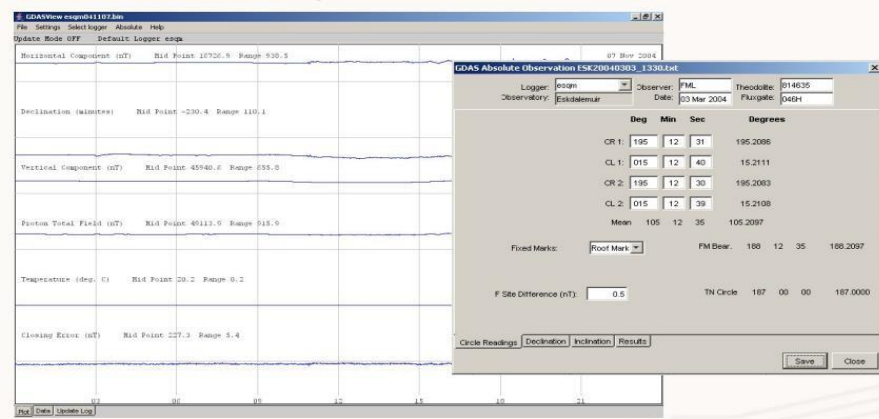


Fig. 8

INTERMAGNET

INTERMAGNET es una red mundial de Observatorios Magnéticos que operan casi en tiempo real. El objetivo de INTERMAGNET es establecer una red global de Observatorios Magnéticos digitales que cooperen, adoptando modernas especificaciones estándar para equipos de medición y registro, con el fin de facilitar el intercambio de datos y la elaboración de productos geomagnéticos en tiempo real.

Existen varios nodos de información geomagnética (GINs) que son utilizados por todos los observatorios del mundo de la red INTERMAGNET para compartir los datos generados por cada uno de ellos. Cada observatorio, como los del SMN, adopta ciertos estándares para las mediciones geomagnéticas y para el monitoreo del equipamiento y transfiere información rápidamente al GINs (Geomagnetic Information Nodes). Esto es posible gracias a los satélites y a las comunicaciones en red. Estos nodos de información geomagnética recogen datos desde su posición en el globo para su difusión a la comunidad en forma oportuna. GINs puede, cuando sea necesario, intercambiar información y también puede difundir productos tal como índices geomagnéticos y modelos de actividad.

En septiembre de 2012, el Observatorio Magnético Pilar fue aceptado como miembro de INTERMAGNET y las mediciones magnéticas generadas con el Sistema INDIGO en el Observatorio de Pilar, son reportadas diariamente a Edimburgo GIN.

La información se puede visualizar en <http://www.intermagnet.org/data-donnee/dataplot-eng.php>

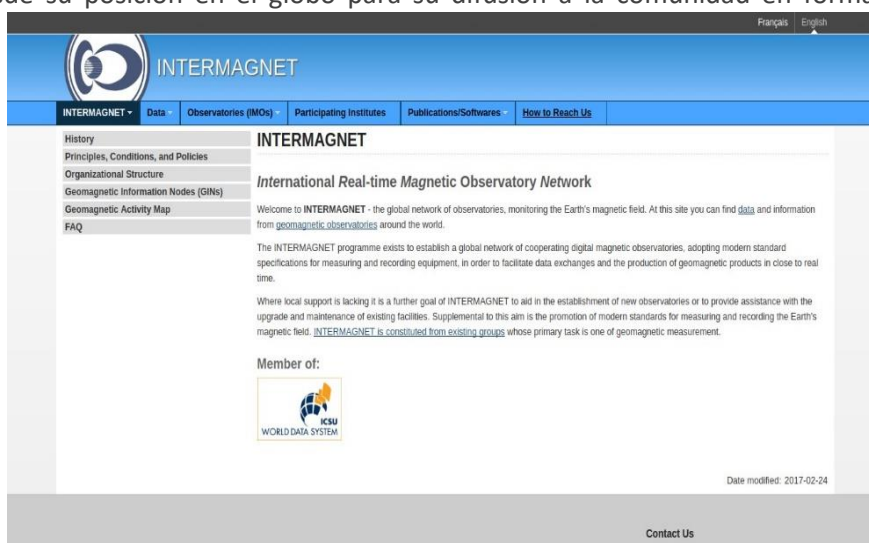


Fig. 9