



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

MARZO 2023



Durante el mes de marzo se apreciaron los efectos de la tormenta geomagnética acontecida entre el 23 y el 25 de marzo, la cual es la más intensa de los últimos 6 años (G4). Estos efectos se manifestaron sobre las mediciones de la componente horizontal del campo geomagnético, como se muestra en [Figura 1](#) y en la [Figura 2](#). A su vez, fuimos testigos de los efectos de la llamarada solar del 3 de marzo (X1.2) que se registraron en las mediciones de campo geomagnético ([Figura 4](#)) y en la ionosonda ([Figura 5](#)). Además, pudimos monitorear el comportamiento de las derivas verticales entre los 300 km y 400 km de altura medidas con el modo JULIA MP del radar principal y compararlas con las mediciones realizadas con transmisores de alta potencia correspondientes al día 9 de marzo.

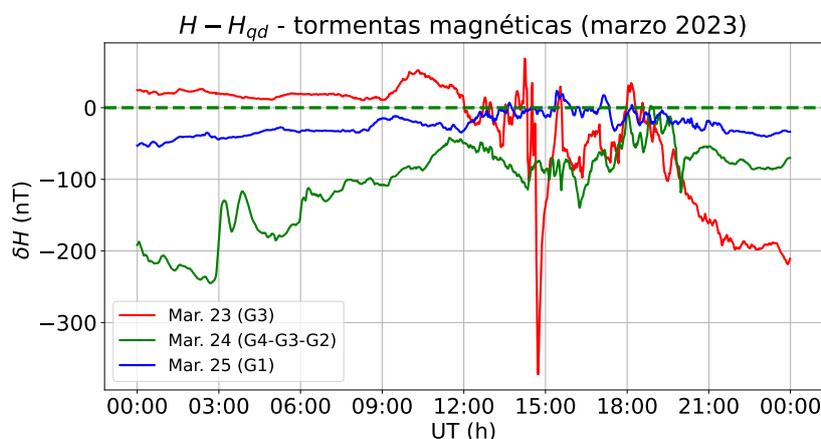


Figura 1. Variación de la componente horizontal del campo geomagnético H respecto al promedio de los 5 días del mes geomagnéticamente más tranquilos (H_{qd}) para los días 23, 24 y 25 de marzo.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de marzo del 2023.

Vientos promedio MLT a 90 km [m/s]		Derivas verticales promedio (300 km- 400 km) [m/s]		Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H) [nT]	
Meridional	Zonal	Mín	Máx	LIM: 192	NAZ: 110
Mín: 70.0 S	Mín: 70.3 O	-35	10	HYO: 179	PIU: 90
Máx: 58.3 N	Máx: 9.2 O				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA			ACTIVIDAD SOLAR: ALTA		

¿SABÍAS QUÉ?

La evolución de las tormentas geomagnéticas se da en fases bien definidas[1]. La primera fase se llama "comienzo súbito de la tormenta" (sudden storm commencement o SSC) que consiste en el incremento del valor del índice Dst de entre 10 nT y 50 nT en decenas de minutos[2], como se puede apreciar en el intervalo entre los instantes t_1 y t_2 en la Figura 2 (tormenta acontecida entre el 23 y 25 de marzo). Esta fase no siempre está presente en las tormentas geomagnéticas y cualquier incremento como el antes señalado no significa todas las veces que estemos ante un SSC[1][2]. Por otro lado, la segunda fase, llamada fase principal, empieza cuando el valor del índice Dst decrece por debajo de -50 nT y termina cuando este valor llega a su valor mínimo, lo que puede tomar entre 2 a 8 horas (intervalo entre los instantes t_2 y t_3). Finalmente, llega la etapa de recuperación, que comprende el periodo desde que se llegó al mínimo valor del índice Dst (instante t_3), hasta que haya incrementado a sus valores de días tranquilos (instante t_4). Estas 3 fases son mostradas en la Figura 2 y se puede apreciar una mejor concordancia entre la tendencia de H durante la tormenta y los

valores del índice Dst que con los valores del índice Kp (barras de colores). Esto se debe a que el índice Dst se calcula monitoreando las variaciones de H en observatorios en el ecuador magnético o muy cerca a él[3], mientras que el índice Kp se calcula tomando en cuenta estaciones magnéticas alrededor de todo el mundo.

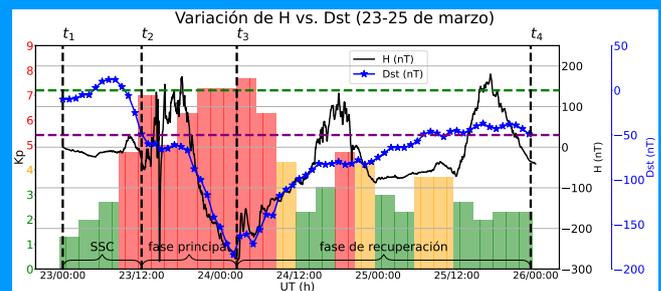


Figura 2. Evolución de la tormenta geomagnética acontecida entre el 23 y 25 de marzo. Variación de H (curva negra), índice Dst (curva azul) e índice Kp (barras de colores) respecto al tiempo.

1. Climatología del mes

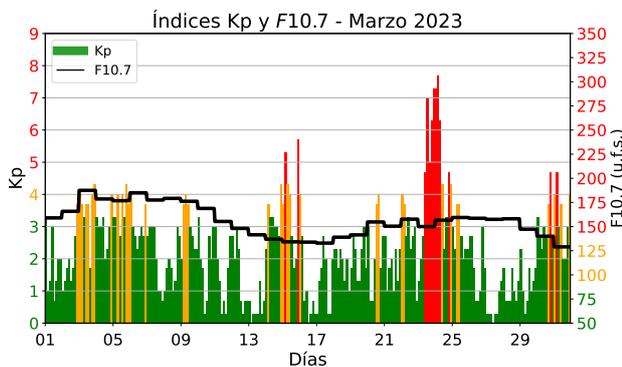


Figura 3. Los valores de los índices Kp y F10.7 cm (s.f.u. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de marzo. Extraídos de [4].

La actividad geomagnética (índice Kp[5]) fue predominantemente tranquila en un 81% del tiempo, moderada en un 14% y alta en un 5%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[6]) fue moderada en un 35% del tiempo y alta en un 65% (Figura 3 y Tabla 1). Además, investigaciones previas señalan que hay una fuerte relación entre la variabilidad diaria y estacional de la componente horizontal del campo geomagnético (H)[7], lo que se refleja en nuestras mediciones.

2. Tormentas geomagnéticas y llamaradas solares

Entre los días 23 y 25 del mes de marzo se registró la tormenta geomagnética más intensa de los últimos 6 años[8] (G4). Esta tormenta no fue anticipada por los sistemas de predicción del clima espacial y se sospecha que pudo ser ocasionada por una CME que pasó cerca a la Tierra[9] y cuya influencia se manifestó mediante la interacción de su campo magnético con el campo magnético terrestre, efecto conocido como reconexión magnética[10], ocasionando perturbaciones en las mediciones de los magnetómetros en tierra, como se muestra en la Figura 1 y en la Figura 2.

Por otro lado, el día 3 de marzo se registró una llamarada solar de intensidad X1.2[9]. Esto se tradujo en un incremento temporal de los valores de la variación diurna de H aproximadamente entre las 12:48 horas y las 14:30 horas, como podemos apreciar entre las líneas negras punteadas en la Figura 4.

Además, el exceso de cargas causado por la penetración de las emisiones electromagnéticas de la llamarada solar ocasionó la absorción y atenuación de señales en la capa D entre las 12:48 horas y las

13:53 horas aproximadamente, como se aprecia en la secuencia de ionogramas mostrada en [Figura 5](#).

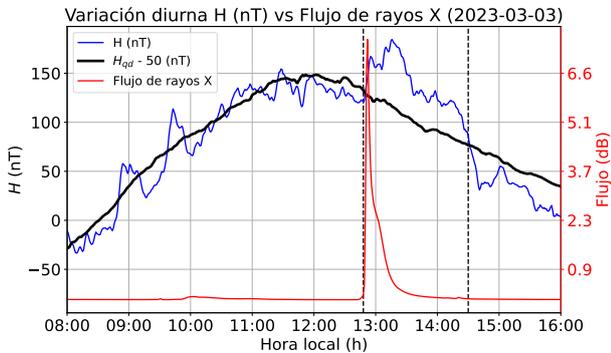


Figura 4. Incremento temporal (entre las líneas negras punteadas) de los valores de la componente horizontal del campo geomagnético H (curva azul) inmediato al pico de rayos X proveniente de la llamarada solar (curva roja). La curva negra representa los valores del promedio de días tranquilos H_{qd} a los que se restó 50 nT (curva negra).

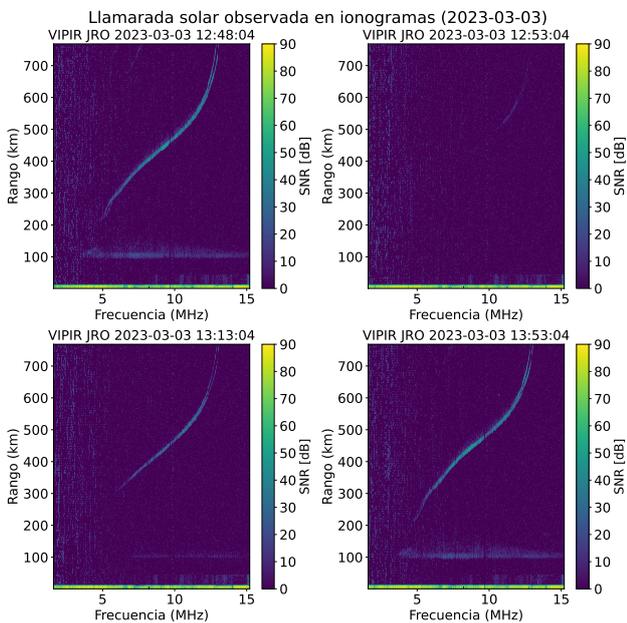


Figura 5. Secuencia del efecto de la llamarada solar. Panel superior izquierdo: Ionograma antes de la llamarada solar. Paneles superior derecho e inferior izquierdo: Atenuación de señales atenuadas por la absorción en la capa D ocasionada por la penetración de la radiación electromagnética producida por la llamarada solar. Panel inferior derecho: Ionograma típico sin atenuación ni absorción (después de la llamarada).

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Durante el mes se monitoreó el comportamiento de las derivas verticales de plasma entre los 300 km y 400 km con el uso del radar principal del IGP-ROJ en su modo JULIA-MP. Las mediciones mensuales promedio indican que las derivas empezaron en cerca de -25 m/s después de la medianoche hasta un poco antes de las 4 de la mañana, que empezaron a incrementar sus valores, hasta llegar a un pico de 10 m/s cerca de las 10:00 horas.

Posteriormente, la magnitud de las derivas volvió a disminuir hasta las 16:00 horas, llegando a los 5 m/s, antes del súbito aumento en las derivas verticales hasta los 10 m/s debido a un fenómeno conocido como pre-reversal enhancement[11] a las 18:30 horas, para finalmente descender durante la noche hasta valores cercanos a los -35 m/s antes de la medianoche.

Además, se estimó el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales de plasma medidas con el radar principal usando transmisores de alta potencia correspondiente al día 9 de marzo (curva magenta). Las mediciones (curvas roja y magenta) muestran una buena concordancia con las predicciones del modelo Scherliess-Fejer (curva negra), como se muestra en la [Figura 6](#).

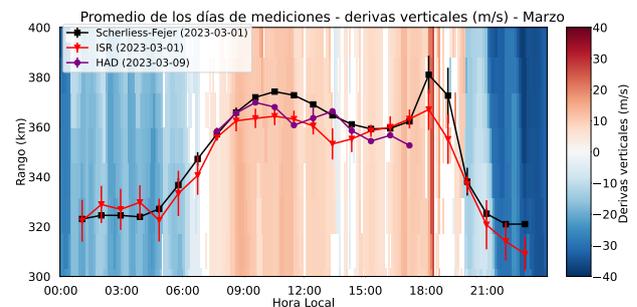


Figura 6. RTI promedio, derivas verticales promediadas en altura medidas con el modo JULIA MP (curva roja) y las derivas verticales promediadas en altura (transmisores de alta potencia) para el 7 de marzo (curva magenta). Comparación del promedio en altura con las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer (curva negra).

Adicionalmente, se registró el comportamiento de los vientos zonales y meridionales en la región de la mesosfera y la baja termósfera de la zona central del Perú con la ayuda del sistema de radar de meteoros especulares SIMONE. El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de marzo, como se aprecia en la [Figura 7](#), muestra periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna).

En la mesopausa (~ 90 km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de -9.2 m/s a las 13:00 horas y el promedio mínimo de -70.3 m/s a las 01:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de $+58.3$ m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -70.0 m/s a las 03:00 horas.

El viento zonal máximo fue de $+131.6$ m/s a las 13:45 horas del día 17 de marzo y el mínimo -135.6 m/s a las 01:45 horas del día 4 de marzo, mientras que el viento meridional máximo fue $+120.5$ m/s a las 11:45 horas del día 27 de marzo y el mínimo -141.4 m/s a las 02:15 horas del día 6 de marzo.

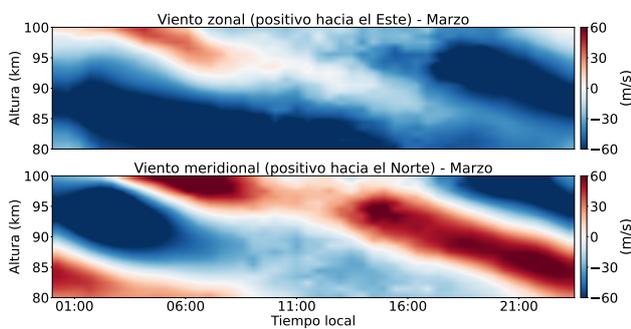


Figura 7. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de marzo del 2023.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ se presentan en la Figura 8. Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron muy por encima de las demás debido a que ambas se encuentran en el ecuador magnético y el Electrochorro Ecuatorial (EEJ) contribuye al incremento en sus mediciones.

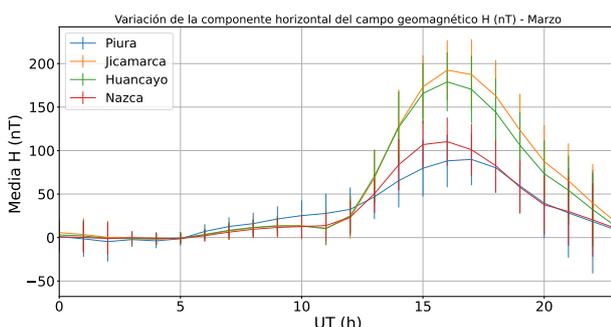


Figura 8. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de marzo del 2023.

Así también, se apreció una gran variabilidad diaria, mayormente a las 11:00 horas (16:00 horas UTC). Se registraron las máximas variaciones del promedio del mes de marzo de H por cada estación: Piura, 90 nT; Jicamarca, 192 nT; Huancayo, 179 nT y Nazca, 110 nT.

5. Conclusiones

- La llamarada solar del 3 de marzo causó un aumento temporal en las mediciones de la variación diurna de H, además de la atenuación y absorción de señales detectadas por los ionogramas en la banda HF.
- La tormenta geomagnética del 23-25 de marzo se manifestó en perturbaciones notorias de la componente horizontal H del campo geomagnético. Además, pudieron apreciarse las 3 fases típicas de una tormenta geomagnética.
- El promedio en altura entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales medidas con el radar principal del IGP-ROJ en su modo JULIA MP mostraron una buena concordancia con las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer y con las mediciones tomadas usando transmisores de alta potencia, a pesar de corresponder a un día diferente (9 de marzo).

6. Referencias

- [1] B. Tsurutani, G. S. Lakhina, and R. Hajra, "The physics of space weather/solar-terrestrial physics (STP): what we know now and what the current and future challenges are, Nonlin," *Processes Geophys*, vol. 27, p. 75–119, Mar. 2020.
- [2] W. D. Gonzalez, J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. K. G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasyliunas, "What is a Geomagnetic Storm?" *J. Geophys. Res.*, vol. 99(A4), p. 5771–5792, 1994.
- [3] "AER Dst Index," Apr. 2023, [Online; accessed 12. April. 2023]. [Online]. Available: [1 https://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index](https://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index)
- [4] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: [1 https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html)
- [5] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [1 https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html](https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html)

- [6] "F10.7 cm Radio Emissions | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center," Jul 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [1https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions](https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions)
- [7] I. Adimula, K. Gidado, and S. Bello, "Variability of horizontal magnetic field intensity from some stations within the equatorial electrojet belt," *Physical Science International Journal*, vol. 13, pp. 1–8, 01 2017.
- [8] "The Earth Struck By the Strongest Geomagnetic Storm in Almost 6 Years! | Weather.com," Apr. 2023, [Online; accessed 12. Apr. 2023]. [Online]. Available: [1https://weather.com/en-IN/india/space/news/2023-03-25-earth-struck-by-the-strongest-geomagnetic-storm-in-almost-6-years](https://weather.com/en-IN/india/space/news/2023-03-25-earth-struck-by-the-strongest-geomagnetic-storm-in-almost-6-years).
- [9] "Space Weather archive – March 2023 | Spaceweather.com," Mar. 2023, [Online; accessed 12. Apr. 2023]. [Online]. Available: [1https://spaceweatherarchive.com/2023/03](https://spaceweatherarchive.com/2023/03)
- [10] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca," Apr. 2023, [Online; accessed 12. Apr. 2023]. [Online]. Available: [1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2023/Boletin_202302.pdf](https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2023/Boletin_202302.pdf).
- [11] J. V. Eccles, J. P. St. Maurice, and R. W. Schunk, "Mechanisms underlying the prereversal enhancement of the vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 6, pp. 4950–4970, 2015. [Online]. Available: [1https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10,1002/2014JA020664](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JA020664)

Elaborado por:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche
Bach. Roberto Flores Arroyo
Mag. Luis Condori Illahuamán
Dr. Edgardo Pacheco Josan

Diseño y diagramación:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche
Bach. Anette De la Cruz Meza

Colaboradores:

Mag. Karim Kuyeng Ruiz
Dr. Danny Scipión Castillo
Dr. Marco Milla Bravo

Contacto:

roj@igp.gob.pe