



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

BOLETÍN
IGP / ROJ / 2025-02



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

FEBRERO 2025



Durante el mes de febrero de 2025 fuimos testigos de 4 tormentas geomagnéticas, tres de ellas de intensidad G1, y una de intensidad G2 ocurrida el 27 de febrero. Esta última tormenta perturbó la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H), así como las derivas verticales ISR, en las cuales se registraron valores infrecuentes durante las horas de la mañana, con un valor máximo de 35 m/s a las 10:30 horas (Figura 1). Además, las mediciones de las derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos difirieron en hasta 23 m/s con lo predicho por la climatología.

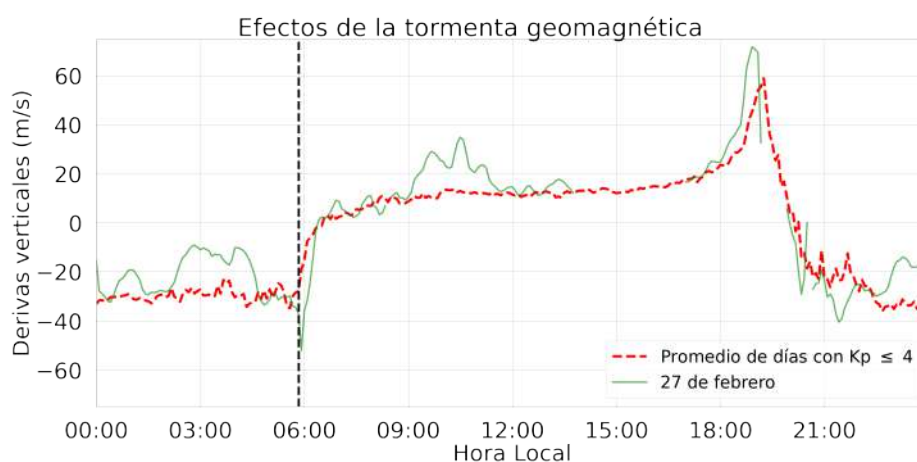


Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética G2, ocurrida el 27 de febrero, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR. La línea vertical negra indica el comienzo de la tormenta.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de febrero del 2025.

Vientos promedios MLT a 90 km [m/s]		Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H)[nT]		Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]	
Meridional	Zonal	LIM: 139	TPP: 79	Mín.	Máx.
Mín: 44.9 S	Mín: 27.4 O	HYO: 137	PIU: 96	-32	39
Máx: 44.6 N	Máx: 3.6 E				

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA A: 5 % M: 23 % T: 72 %	ACTIVIDAD SOLAR: ALTA A: 96 % M: 4 % B: 0 %
--	---

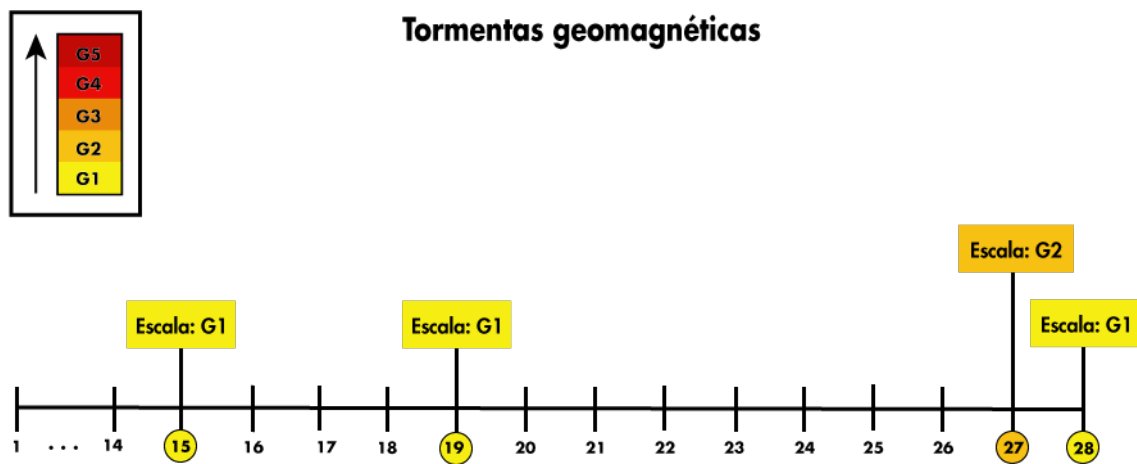


Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de febrero.

¿SABÍAS QUÉ?

El plasma en la región F de la ionósfera se mueve, típicamente, hacia arriba durante el día y hacia abajo durante la noche. Ello se debe a la acción del sol y a procesos de dínamo en las regiones E y F lo cuales poseen una variabilidad estacional. Este movimiento puede ser perturbado debido a fenómenos ionosféricos como los calentamientos estratosféricos repentinos, fenómenos externos como las tormentas geomagnéticas e incluso a fenómenos que ocurren en la baja atmósfera como las erupciones volcánicas y los tsunamis. Estos

fenómenos modifican los campos eléctricos de la región F a través de distintos mecanismos los cuales provocan que el plasma se mueva con diferente velocidad y hasta puedan cambiar de dirección dependiendo de la intensidad del fenómeno. Por ejemplo, este mes se registró una tormenta geomagnética de clase G2, y aunque no fue tan intensa, provocó que las derivas verticales de plasma durante el día alcancen valores de 35 m/s (Figura 1), un valor que triplica las velocidades registradas durante los días tranquilos.

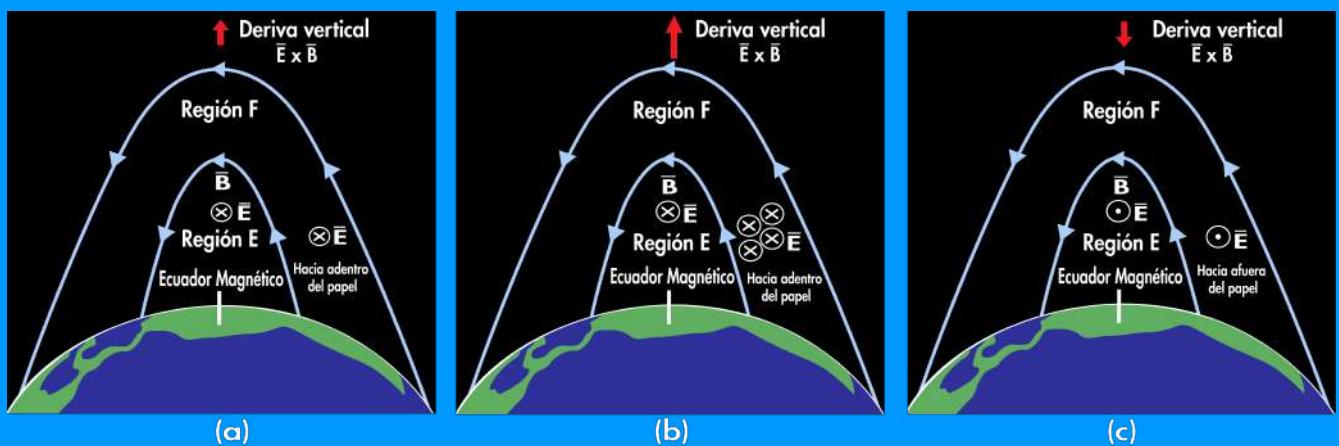


Figura 3. Representación del vórtice polar estratosférico. Las flechas indican la dirección de los vientos atmosféricos. Imagen adaptada de Climate.gov[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[2]) fue predominantemente tranquila en un 72 % del tiempo, moderada en un 23 % y alta en un 5 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[3]) fue alta un 96 % del tiempo y 4 % moderada (Figura 4 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)[4], lo que se refleja en nuestras mediciones.

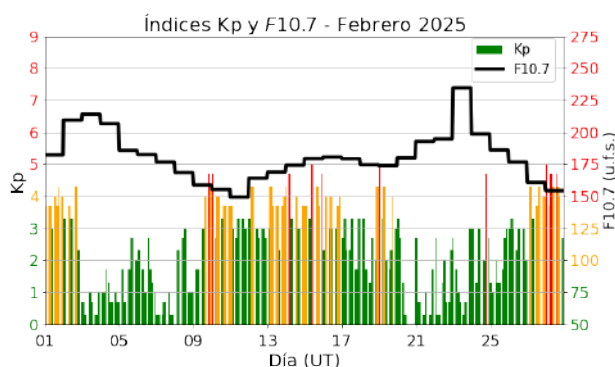


Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm ($\text{u.f.s.} = 10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de febrero. Extraídos de OMNIWeb.

Para los meses cercanos al solsticio de marzo (febrero, marzo, abril), en un régimen de actividad solar alta, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea mayor para el intervalo de tiempo anterior a la medianoche[5]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de febrero para un régimen de actividad solar alta (dada por el modelo de Scherliess-Fejer) indica que el promedio en altura (300-400 km) de las derivas verticales de plasma tiene un valor cercano a los -22 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 19 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 7 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 26 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -23 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran poca concordancia con las mediciones salvo para las horas después del amanecer.

Estudios climatológicos indican que cerca a los meses del equinoccio de marzo los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 09:00 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 140 km y los 165 km de altura. En este periodo, encontramos que la máxima altura de aparición fue mayor en

5 km que lo esperado mientras que la mínima altura de aparición coincide con la climatología. Además, estas irregularidades aparecen y desaparecen media hora después de lo esperado.

2. Tormentas geomagnéticas

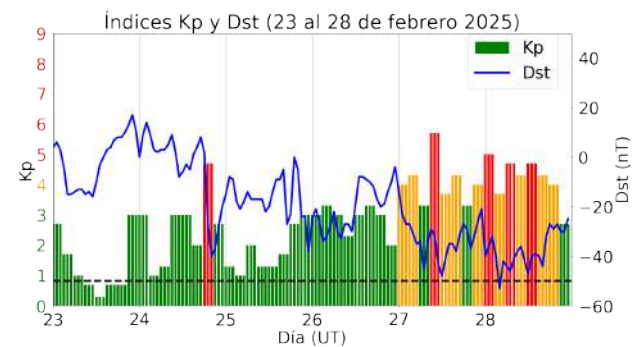


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 23 al 28 de febrero. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La creciente actividad solar y el acercamiento al máximo del presente ciclo solar esperado para julio 2025[7] se manifestó en la ocurrencia de 4 tormentas geomagnéticas (Figura 5). Estas acontecieron los días 15, 19, 27 y 28 de febrero, las cuales fueron de intensidad G1, a excepción de la ocurrida el 27 cuya intensidad fue de clase G2[7], con un valor de índice Dst de -48 nT y aunque no sobrepasa los -50 nT, se considera tormenta geomagnética por su valor de Kp asociado ($K_p = 6$)[8].

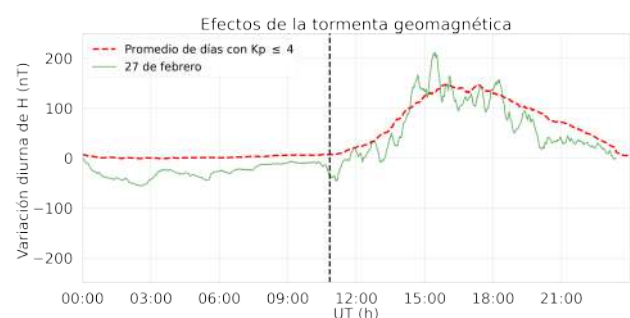


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 27 de febrero, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca. La línea vertical negra indica el comienzo de la tormenta.

La tormenta más intensa del presente mes, de clase G2, produjo perturbaciones en las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) en la estación de Jicamarca, como se aprecia en la Figura 6. Como consecuencia, se registraron oscilaciones (curva verde) a comparación del promedio de los días

geomagnéticamente tranquilos (curva roja). Pasadas las 10:00 horas (15:00 horas UTC) se observa un incremento que sobrepasa los 200 nT y luego empieza a descender oscilando. Además, similares oscilaciones fueron detectadas en las estimaciones de las derivas verticales ISR (Figura 1) medidas con el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ). Pasadas las 09:00 horas se registró un incremento (curva verde) que oscila hasta alcanzar los 35 m/s a las 10:30 horas, lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos (curva roja), en donde se observaron valores de alrededor de 13 m/s.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 5 días geomagnéticamente tranquilos, con el modo JULIA-MP, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en la Figura 7 que los Ecos de 150 km inician a las 09:30 horas y desaparecen pasadas las 16:00 horas, además éstos están contenidos entre los 140 km y los 170 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología, ya que tanto la hora de inicio como la desaparición de los Ecos de 150 km ocurrieron media hora después que lo predicho por la climatología y la máxima altura de aparición ocurrió 5 km por encima de lo esperado.

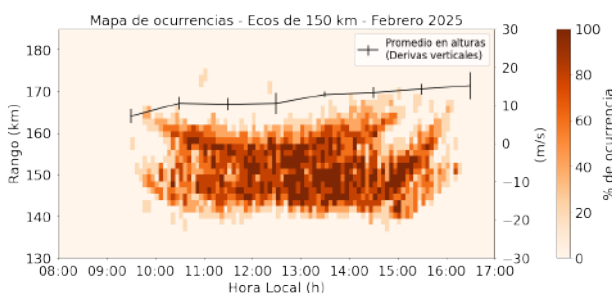


Figura 7. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

En cuanto a las derivas verticales de plasma, se realizaron 13 días (5 días completos y 8 días solo durante la noche) de mediciones entre los 300 km y 400 km durante los días geomagnéticamente tranquilos del mes haciendo uso del radar principal del IGP-ROJ con el modo JULIA-MP. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -30 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para aumentar hasta cambiar de dirección (hacia arriba) a las 06:00 horas. Luego incrementaron hasta llegar a un valor cercano a

13 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, las derivas se mantuvieron casi constantes, a diferencia de meses anteriores, hasta que aconteció el incremento súbito a las 19:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[6], alcanzando valores cercanos a los 39 m/s (Figura 8). Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben poca concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 23 m/s a las 19:00 horas.

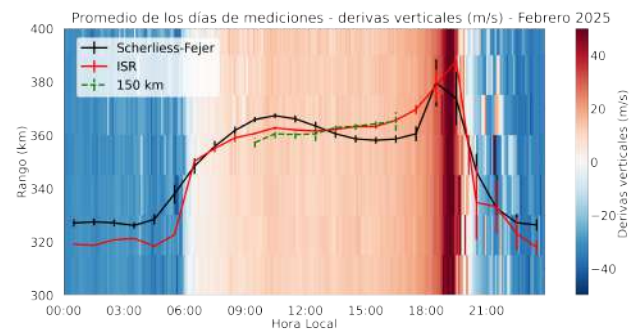


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de febrero. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Asimismo, se realizaron 27 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[9], periodo durante el cual se observó la presencia de 21 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la de tipo Pluma de radar, con 68 % de ocurrencia, seguida por la del tipo Bottomside, con un 14 % y las de menor ocurrencia fueron las tipo Bottom-type y Post-Midnight con 9 % cada una, como se aprecia en la Figura 9.

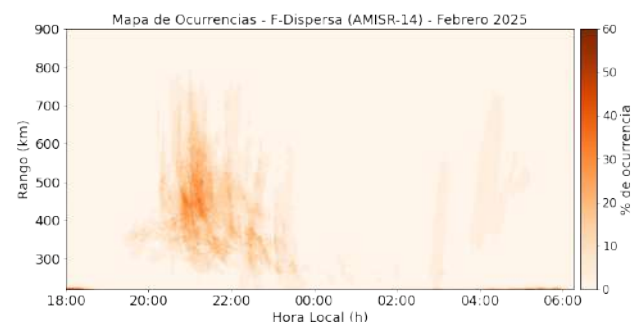


Figura 9. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

Además, el sistema de radar JULIA-MP funcionó durante 13 noches, durante las cuales se detectaron 13 irregularidades entre los 200 km y los 900 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Pluma de radar, con 70 %, seguida por las del tipo Bottom-type y Bottomside, con un 15 % cada una, como se aprecia en la Figura 10. La diferencia del número

diferente de irregularidades detectadas por ambos sistemas se debe a que no funcionaron necesariamente las mismas noches o que en algunas ocasiones solo el radar JULIA-MP logró detectar irregularidades probablemente por su frecuencia de operación (50 MHz) diferente a la de AMISR-14 (445 MHz), además de que ambos radares no apuntan a la misma región de la ionosfera. Las observaciones de ambos sistemas concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[10].

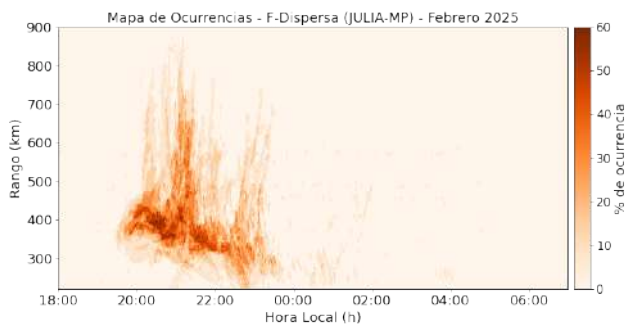


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema JULIA-MP.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de febrero, como se aprecia en la Figura 11, muestra periodos predominantes de 12 horas y 24 horas (marea solar semidiurna y diurna respectivamente). En la mesopausa (~ 90 km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de $+3.6$ m/s a las 16:00 horas y el promedio mínimo de -27.4 m/s a las 00:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de $+44.6$ m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -44.9 m/s a las 10:00 horas. El viento zonal máximo fue de $+67.8$ m/s a las 05:15 horas del día 18 de febrero y el mínimo -94.1 m/s a las 01:45 horas del día 13 de febrero, mientras que el viento meridional máximo fue $+119.1$ m/s a las 18:45 horas del día 14 de febrero y el mínimo -116.8 m/s a las 10:45 horas del día 03 de febrero.

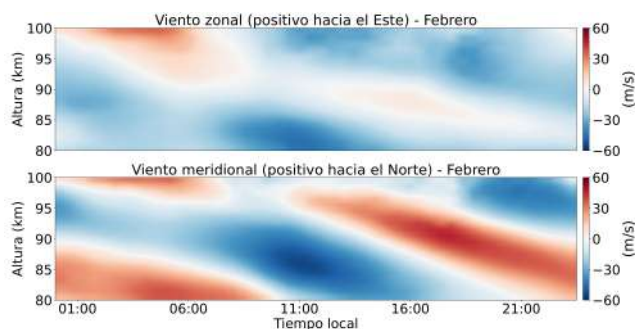


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de febrero del 2025.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

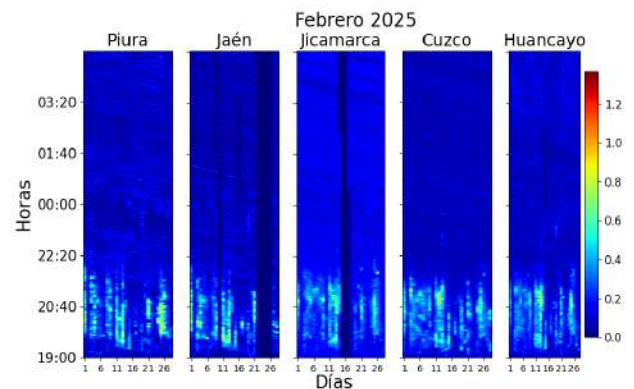


Figura 12. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca, Cuzco y Huancayo durante el mes de febrero. Se observa una actividad moderada y alta.

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ durante los días geomagnéticamente tranquilos se presentan en la Figura 13. Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron por encima de las demás debido a que se encuentran en el ecuador magnético y el Electrochorro Ecuatorial (EEJ) contribuye al incremento en sus mediciones. 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 febrero de H por cada estación: Piura, 96 nT; Tarapoto, 79 nT; Huancayo, 137 nT y Jicamarca, 139 nT.

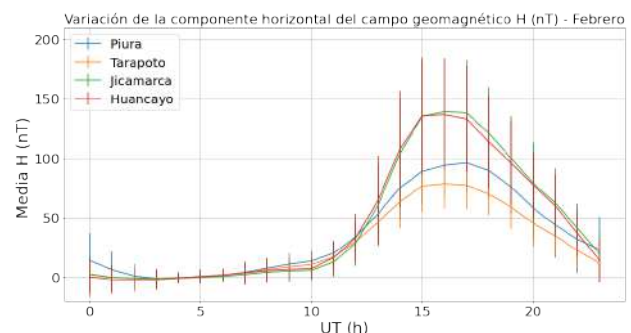


Figura 13. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de febrero.

5. Conclusiones

- Se registraron oscilaciones de las derivas verticales diurnas durante el día 27 de febrero debido a la tormenta geomagnética de clase G2. Estos valores

alcanzaron los 35 m/s a las 11:30 horas, el triple en comparación al promedio mensual.

- Los valores diurnos de las derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos no descendieron hasta después del pre-reversal enhancement, lo cual difiere totalmente con lo predicho por la climatología.
- La ocurrencia de la F-Dispersa medida por el radar JULIA-MP y el radar AMISR-14 es mayoritaria para el horario antes de la medianoche y tiene correlación con la amplitud del índice S4 la cual es más intensa durante el mismo horario para todas las estaciones disponibles del mes.

6. Referencias

- [1] B. T. 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," *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 27(1), pp. 75–119, 2020.
- [2] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html>
- [3] "F10.7 cm Radio Emissions | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center," Jul 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>
- [4] 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.
- [5] W. Zhan, F. S. Rodrigues, and M. A. Milla, "On the genesis of postmidnight equatorial spread f: Results for the american/peruvian sector," *Geophysical Research Letters*, vol. 45, no. 15, pp. 7354–7361, 2018.
- [6] J. V. Eccles, J. P. St. Maurice, and R. W. Schunk, "Mechanisms underlying the pre-reversal enhancement of the vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere," *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 120, p. 4950– 4970, 2015.
- [7] "Analysis determines we are in solar cycle 25," [2025, January 19]. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>
- [8] "Catalog of geomagnetic storms with dst index ≤ -50 nt and their solar and interplanetary origin [1996–2019]." [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/atmos14121744>
- [9] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca," Aug. 2022, [Online; accessed 14. jan. 2024]. [Online]. Available: https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf
- [10] "Geostationary operational environmental satellites - r series | noaa/nasa," [2024, March 14]. [Online]. Available: <https://www.goes-r.gov>

Elaborado por:

Bach. Roberto Flores Arroyo

Diseño y diagramación:

Bach. Anette De la Cruz Meza

Colaboradores:

Mag. Karim Kuyeng Ruiz
Dr. Danny Scipión Castillo
Dr. Marco Milla Bravo
Mag. Luis Condori Illahuamán
Dr. Edgardo Pacheco Josan
Dr. Ram Singh

Contacto:

roj@igp.gob.pe

Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ)
Instituto Geofísico del Perú
Lurigancho-Chosica, Lima, Perú
Teléfono: +51 1 3172313
Webpage: www.gob.pe/igp

**"Ciencia para protegernos
ciencia para avanzar"**