



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

ENERO 2025



El primero de enero del 2025 fuimos testigos de una tormenta geomagnética de intensidad G4. Esta tormenta perturbó la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H), así como las derivas verticales ISR, cuyas mediciones registraron valores negativos, infrecuentes de las derivas verticales durante las horas de la mañana y un valor inusual de 44 m/s a las 12:20 horas. Además, debido a un posible calentamiento estratosférico repentino se realizó una campaña, que duró 10 días, en coordinación con otros observatorios alrededor del mundo para monitorear los parámetros ionosféricos tales como la densidad de electrones (Figura 1) y las derivas verticales de plasma.

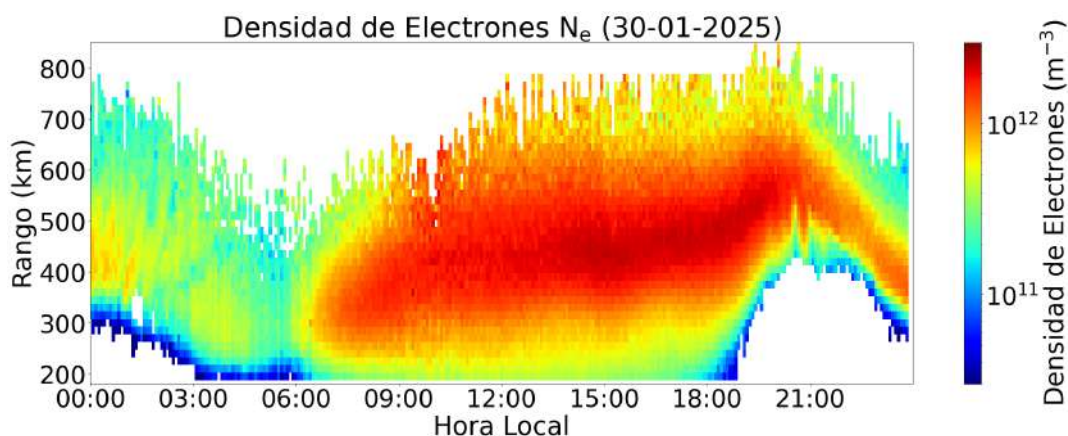


Figura 1. Densidades de electrones obtenidas con el radar principal durante campaña SSW.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de enero 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: 146	TPP: 82	Mín.	Máx.
Mín: 28.9 S	Mín: 23.3 O	HYO: 142	PIU: 86	-23	31
Máx: 32.7 N	Máx: 16.1 E				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA A: 4 % M: 11 % T: 85 %				ACTIVIDAD SOLAR: ALTA A: 100 % M: 0 % B: 0 %	

Tormentas geomagnéticas

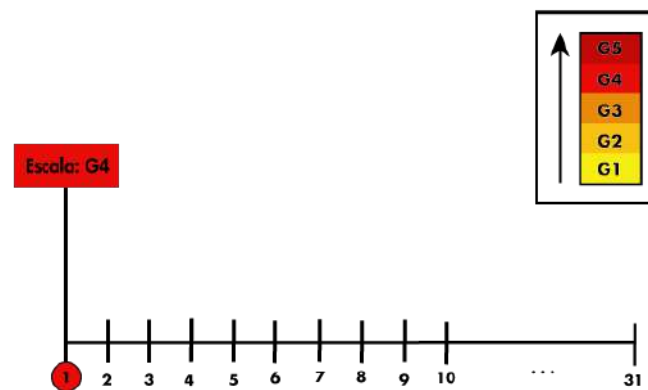


Figura 2. Intensidad de la tormenta geomagnética del mes de enero.

¿SABÍAS QUÉ?

Un evento de calentamiento estratosférico repentino (SSW, por sus siglas en inglés) es una disrupción significativa del vórtice polar estratosférico que comienza con ondas atmosféricas de gran escala que son empujadas más arriba en la atmósfera. Estas ondas se pueden "romper" en la parte superior del vórtice polar y debilitarlo. Si estas ondas son lo suficientemente fuertes, los vientos del vórtice polar se pueden debilitar tanto que pueden cambiar de dirección, de oeste a este. Esto produce que el aire frío descienda y se caliente rápidamente, lo cual puede provocar un desplazamiento o ruptura del vórtice polar, por lo cual en lugar de que el aire frío permanezca encima de la región polar, este puede ser empujado hacia el sur hasta medias latitudes[1]. Además, estos eventos pueden provocar perturbaciones en las derivas verticales y en la densidad de electrones de regiones ecuatoriales[2]. Por ello, ante un posible evento de SSW, el IGP-ROJ realiza campañas en conjunto con otros observatorios alrededor del mundo

para monitorear los parámetros ionosféricos que puedan ser perturbados (Figura 1).

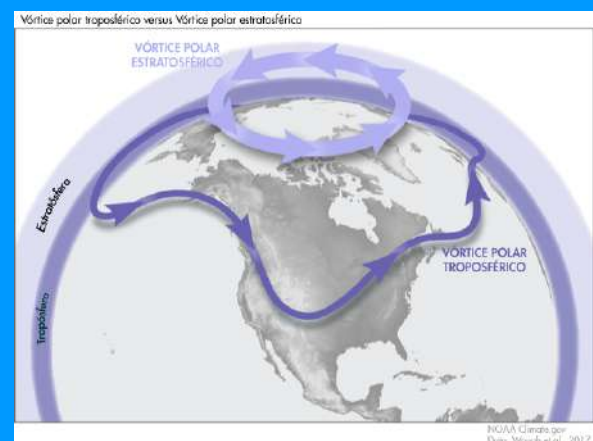


Figura 3. Representación del vórtice polar estratosférico. Las flechas indican la dirección de los vientos atmosféricos. Imagen adaptada de Climate.gov[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp) fue predominantemente tranquila en un 85 % del tiempo, moderada en un 11 % y alta en un 4 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7) fue alta el 100 % del tiempo (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), lo que se refleja en nuestras mediciones.

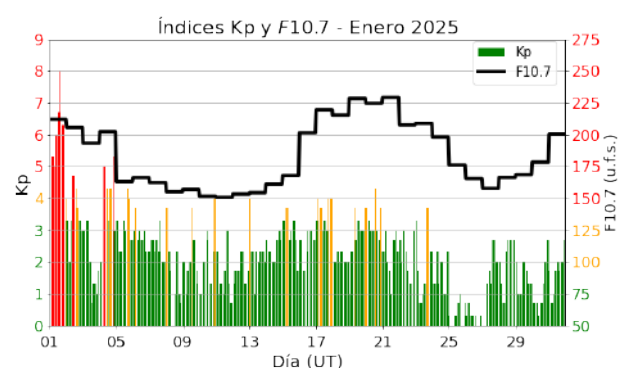


Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de enero. Extraídos de OMNIWeb.

Para los meses cercanos al solsticio de diciembre (noviembre, diciembre, enero), 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. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de enero 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 -23 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 16 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 8 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement, hasta 28 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 una moderada concordancia con las mediciones salvo para las horas antes del amanecer.

Estudios climatológicos indican que cerca a los meses del solsticio de diciembre los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 08:00 horas, desaparecen a las 16:00 horas y están contenidos entre los 138 km y los 175 km de altura. En este periodo, encontramos que la máxima altura de aparición fue menor en 5 km que lo esperado mientras que la mínima altura de aparición coincide con la climatología. Además, estas irregularidades aparecen y desaparecen a la hora esperada.

2. Tormentas geomagnéticas

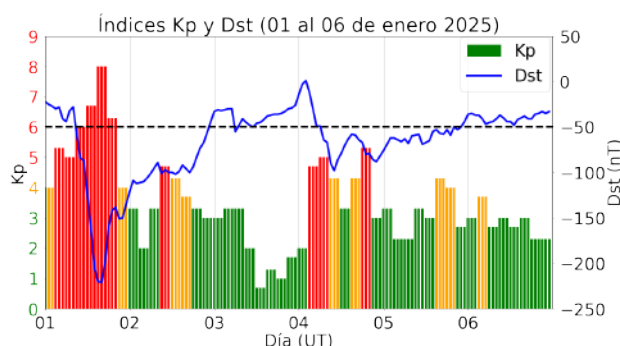


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 01 al 06 de enero 2025. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La creciente actividad solar y el acercamiento al máximo del presente ciclo solar esperado para julio 2025[3] se manifestó en la ocurrencia de una tormenta

geomagnética (Figura 5). Esta alcanzó la clasificación G4 a las 09:45 horas del día primero de enero pero perturbó la ionósfera terrestre desde antes de la medianoche, y fue causada por una eyección de masa coronal (CME) emitida el 29 de diciembre de 2024[4]. Además, el índice Dst asociado a esta tormenta alcanzó los -220 nT.

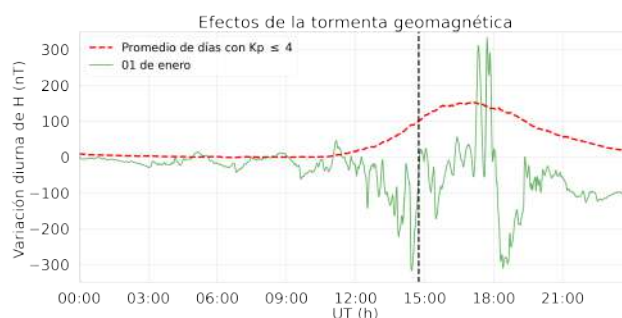


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el primero de enero, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca. La línea vertical negra indica el momento en que la tormenta alcanza la clasificación G4. .

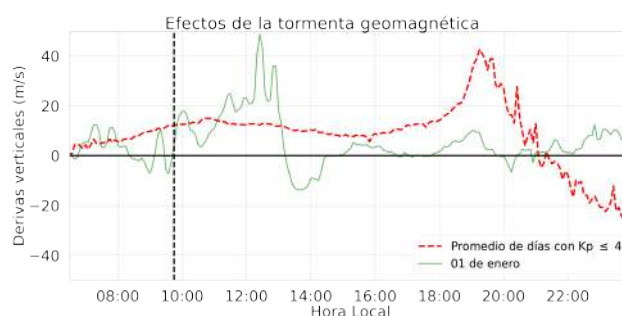


Figura 7. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el primero de enero, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR. La línea vertical negra indica el momento en que la tormenta alcanza la clasificación G4.

Esta tormenta 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, así como sobre las estimaciones de las derivas verticales ISR (Figura 7) medidas con el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ). Esta tormenta produjo oscilaciones en la variación diurna de H (curva verde) a comparación del promedio de los días geomagnéticamente tranquilos (curva roja). Pasadas las 06:00 horas (11:00 horas UTC) se observa un decremento que sobrepasa los -300 nT a las 09:40 horas (14:40 horas UTC), mientras que pasadas las 12:00 horas (17:00 horas UTC) la magnitud alcanza valores de 310 nT. Por otro lado, la tormenta G4 también perturbó las estimaciones de las derivas

verticales produciendo similares oscilaciones en las mediciones. Pasadas las 06:00 horas se registraron valores de hasta 35 m/s, lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos, en donde se observan valores de alrededor de 3 m/s. Además, durante el resto del día, las derivas cambian de dirección, registrándose un valor máximo de 44 m/s a las 12:20 horas y un valor mínimo de -15 m/s a las 13:30 horas.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Entre el 21 y el 31 de enero se realizó una campaña usando el radar principal del IGP-ROJ para registrar los efectos sobre las densidades de electrones en la capa F de la ionosfera debido a un posible calentamiento estratosférico repentino. Durante este periodo, la presencia de F-Dispersa en la mayoría de las noches no permitió la estimación de las densidades, excepto durante el día 30 de enero donde estas irregularidades duraron pocos minutos y se desarrollaron en un rango de 50 km, por lo cual se pudieron medir las densidades de manera casi continua (Figura 1). Durante este día, la densidad máxima de $2.38 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ ocurrió a las 16:50 horas a una altura de 465 km.

Además, se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 8 días geomagnéticamente tranquilos con el modo JULIA MP, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en Figura 8 que los ecos empiezan a las 08:00 horas, desaparecen a las 16:00 horas, y que están contenidos entre los 138 km y los 170 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología, excepto por la máxima altura de aparición la cual ocurrió 5 km por debajo de lo esperado.

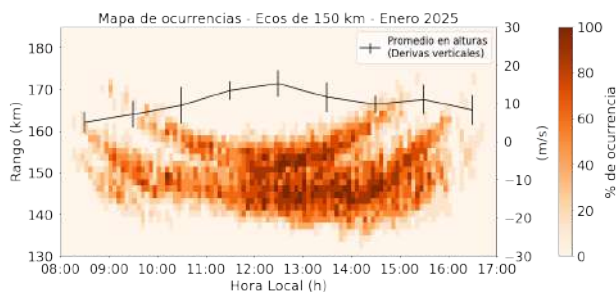


Figura 8. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

Por otro lado, durante los días geomagnéticamente tranquilos del mes se realizaron 19 días de mediciones (8 días completos y 11 días solo durante la noche) de las derivas verticales de plasma entre los 300 y

400 km de altura con el uso del radar principal del IGP-ROJ con el modo JULIA MP. Además se realizaron 11 días completos de mediciones durante la campaña SSW usando los transmisores de alta potencia. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -23 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 14 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 19:00 horas conocido como pre-reversal enhancement, alcanzando valores cercanos a los 34 m/s (Figura 9). Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 17 m/s a las 05:00 horas.

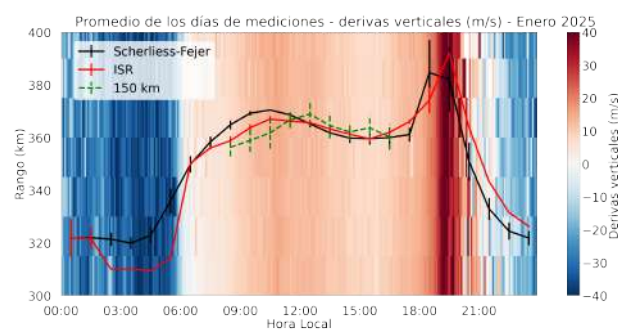


Figura 9. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de enero. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Asimismo, se realizaron 26 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual se observó la presencia de 21 irregularidades en la Capa F, entre los 300 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la de tipo Pluma de radar, con 57 % de ocurrencia, seguida por la del tipo Bottomside, con un 24 % y Bottom-type, con 19 %, como se aprecia en la Figura 10. Además, el sistema de radar JULIA-MP realizó mediciones durante 17 noches, durante las cuales se detectaron 20 irregularidades entre los 200 km y los 800 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Pluma de radar, con 50 %, seguida por la del tipo Bottom-type, con un 30 % y Bottomside, con 20 %, como se aprecia en la Figura 11. La diferencia del número de irregularidades detectadas por ambos sistemas se debe a que no necesariamente funcionaron las mismas noches o que en algunas ocasiones solo el radar JULIA-MP logró detectar irregularidades probablemente porque su frecuencia de operación (50 MHz) es 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)[5].

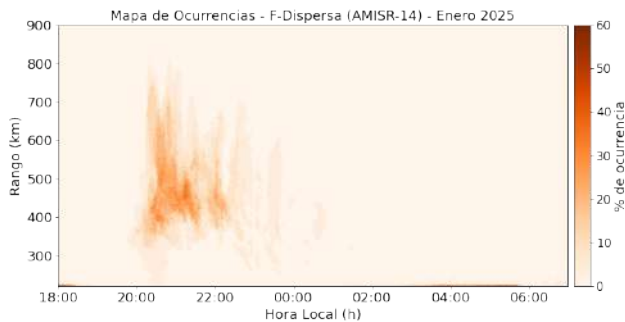


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

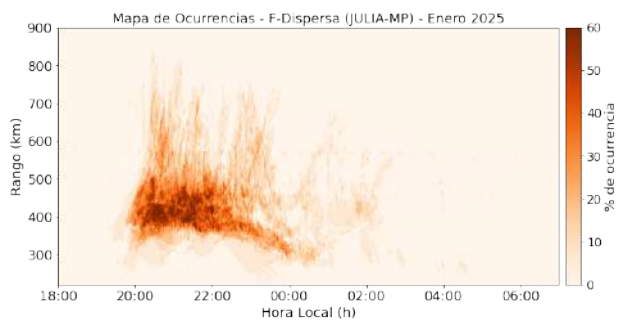


Figura 11. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema JULIA MP.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de enero, como se aprecia en la Figura 12, muestra periodos predominantes de 12 horas y 24 horas (marea solar semidiurna y diurna respectivamente). Este mes tiene un comportamiento similar al de diciembre del año pasado, ya que se muestra una importante presencia de las mareas de 12 horas en el viento zonal, a diferencia de la mayoría de los meses donde predomina la marea de 24 horas, lo cual concuerda con estudios climatológicos pero realizados para un periodo de actividad solar bajo-moderado[6]. En la mesopausa (~ 90 km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de $+16.1$ m/s a las 18:00 horas y el promedio mínimo de -23.3 m/s a la 01:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de $+32.7$ m/s a las 20:30 horas y el promedio mínimo de -28.9 m/s a las 10:30 horas. El viento zonal máximo fue de $+99.4$ m/s a las 06:15 horas del día 05 de enero y el mínimo -98.3 m/s a las 02:15 horas del día 20 de enero, mientras que el viento meridional máximo fue $+131.4$ m/s a las 17:15 horas del día 03 de enero y el mínimo -97.8 m/s a las 13:45 horas del día 19 de enero.

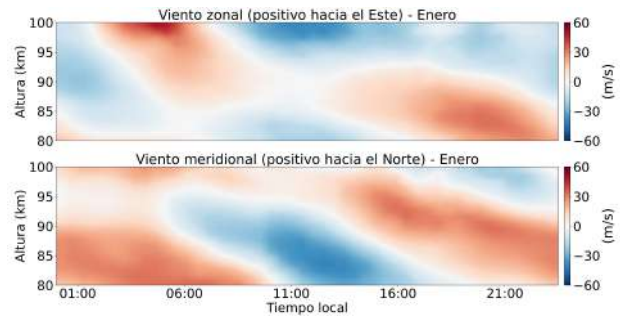


Figura 12. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de enero del 2025.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S_4) de las estaciones de Piura, San Bartolomé, Jicamarca y Cuzco se muestran en la Figura 13. Durante el periodo de estudio se observaron valores bajos, moderados y altos entre las 19:00 y 22:00 horas. La mayor actividad del mes ($\Delta S_{4mx} = 1.1$) se produjo en la estación de Piura el día 12 a las 21:00 horas aproximadamente.

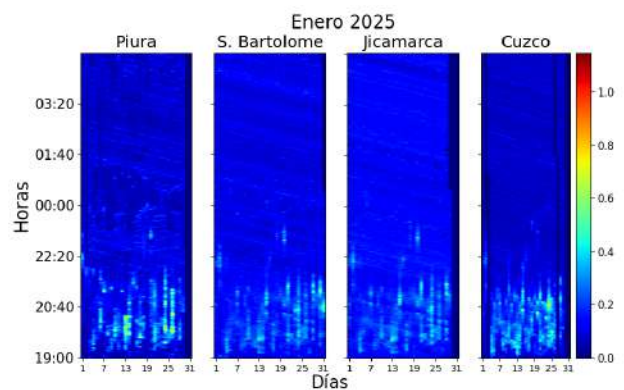


Figura 13. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de noviembre.

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 14. 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 enero de H por cada estación: Piura,

86 nT; Tarapoto, 82 nT; Huancayo, 142 nT y Jicamarca, 146 nT.

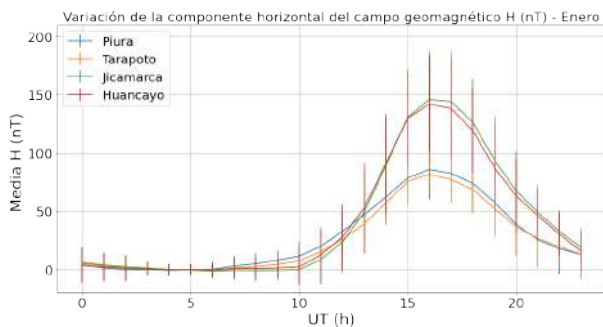


Figura 14. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de noviembre.

5. Conclusiones

- Se registraron valores negativos inusuales de las derivas verticales durante el día 01 de enero debido a la tormenta geomagnética de clase G4. Además, los valores positivos alcanzaron los 44 m/s a las 12:20 horas, un valor 3 veces más alto que el promedio mensual.
- 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.

Elaborado por:

Bach. Roberto Flores Arroyo

Diseño y diagramación:

Bach. Anette De la Cruz Meza

6. Referencias

- [1] "Sudden stratospheric warming events," 2025. [Online]. Available: https://www.weather.gov/bis/sudden_stratospheric_warming_events
- [2] J. L. Chau, L. P. Goncharenko, B. G. Fejer, and H. L. Liu, "Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events: Ionospheric effects during ssw events," pp. 385–417, 2012.
- [3] "Let's compare! halloween 2003 vs may 2024 solar storms!" [2024, May 17]. [Online]. Available: <https://www.spaceweatherlive.com/en/news/view/544/20240517-let-s-compare-halloween-2003-vs-may-2024-solar-storms.html>
- [4] "Show prediction detail," https://kawaii.ccmc.gsfc.nasa.gov/CME_scoreboard/prediction/detail/2263.
- [5] "Geostationary operational environmental satellites - r series | noaa/nasa," [2024, March 14]. [Online]. Available: <https://www.goes-r.gov>
- [6] J. Suclupe, J. L. Chau, J. F. Conte, M. Milla, N. M. Pedatella, and K. Kuyeng, "Climatology of mesosphere and lower thermosphere diurnal tides over Jicamarca (12° S, 77° W): observations and simulations," vol. 75(1), p. 186, 2023.

Colaboradores:

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

Contacto:

roj@igp.gob.pe