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 / 2025-04

LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

ABRIL 2025

IGP

Durante el mes de abril de 2025 fuimos testigos de 3 tormentas geomagnéticas, dos con una intensidad de G1, y una con intensidad de G4. La tormenta más intensa ocurrió el 15-16 de abril y tuvo un impacto significativo en las mediciones de las derivas verticales de plasma (Figura 1), en donde durante el día se observaron oscilaciones entre velocidades positivas y negativas. Además, se pudieron registrar valores de hasta 45 m/s a las 14:00 horas, lo cual difiere significativamente con el promedio de los días geomagnéticamente tranquilos (10 m/s).

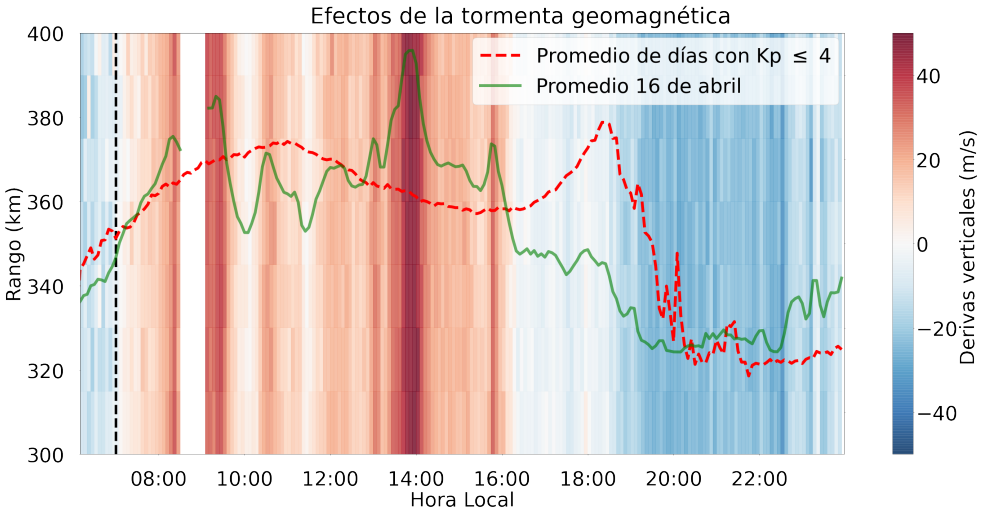

Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 16 de abril, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR. La línea vertical negra indica la hora a la cual la tormenta alcanzó la clase G4.

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

Vientos promedios MLT a 90 km [m/s]	
Meridional	Zonal
Mín: 75.1 S Máx: 57.6 N	Mín: 44.7 O Máx: 8.9 E

Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H)[nT]	
LIM: 184	TPP: 91
HYO: 181	PIU: 91

Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]	
Mín.	Máx.
-28	26

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: **TRANQUILA**	ACTIVIDAD SOLAR: **ALTA**
A: 10 % M: 18 % T: 72 %	A: 97 % M: 3 % B: 0 %

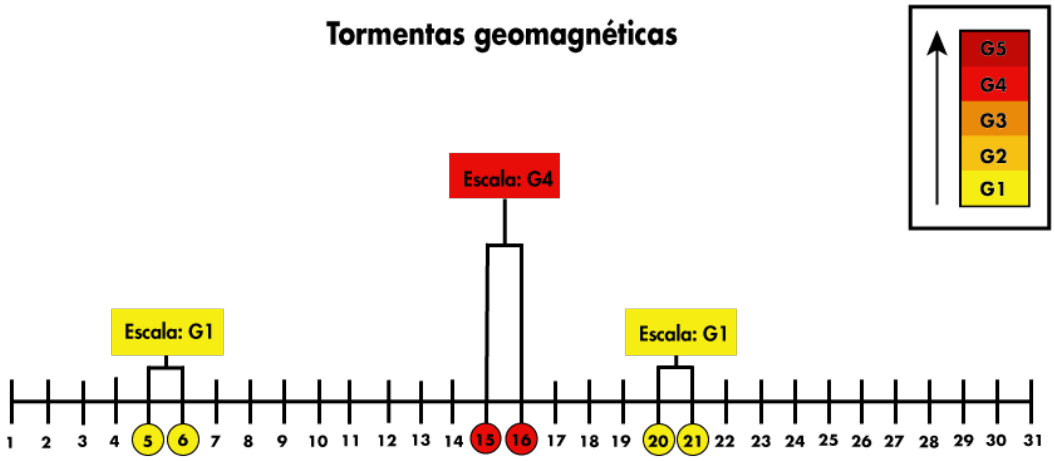

Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de abril.

¿SABÍAS QUÉ?

Antes de que la antena principal del Radio Observatorio de Jicamarca y el edificio que contiene el transmisor sean terminados ya se habían podido realizar las primeras mediciones de ecos incoherentes y con ellos estimar las densidades de electrones hasta una altura de 1000 km (Figura 3). Este hecho fue gracias a que se usó un octavo de la antena y un transmisor modificado que había sido usado años atrás en otro proyecto de radio propagación. Además, estas primeras mediciones mostraron experimentalmente, y por primera vez en latitudes ecuatoriales, el decaimiento exponencial de la densidad de electrones por encima del pico de la capa F y que este decaimiento varía considerablemente día a día y según la hora del día. Finalmente, estas mediciones mostraron al mundo las capacidades que tenía el Radio Observatorio de Jicamarca incluso antes de que su construcción estuviera finalizada[1].

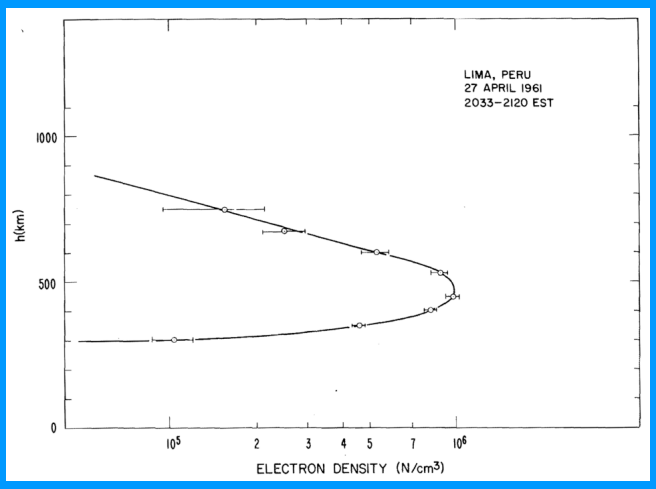

Figura 3. Primera medición de densidad de electrones en el Radio Observatorio de Jicamarca, abril de 1961. Imagen extraída de Woodman et al., 2019[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[2]) fue predominantemente tranquila en un 72 % del tiempo, moderada en un 18 % y alta en un 10 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[3]) fue alta un 97 % del tiempo y 3 % 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.

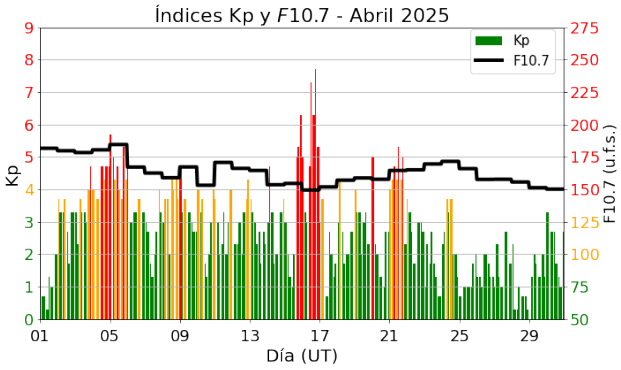

Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22}\mathrm{W}m^{-2}Hz^{-1}$) para el mes de abril. Extraídos de OMNIWeb.

Para los meses cercanos al equinoccio 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 abril 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 22 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 9 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 28 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -26 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran buena concordancia con las mediciones.

Estudios climatológicos[7] 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 de acuerdo a lo esperado.

2. Tormentas geomagnéticas

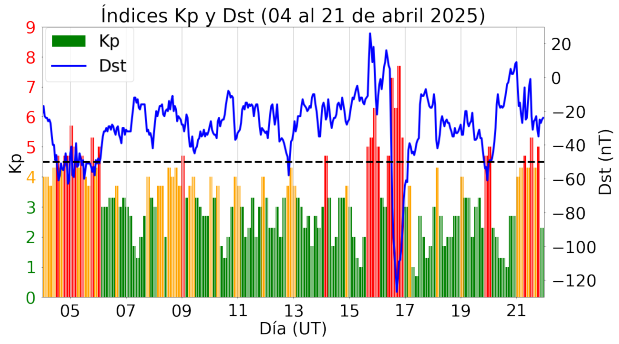

Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 04 al 21 de abril. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La alta actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 3 tormentas geomagnéticas (Figura 5), las cuales acontecieron los días 5-6, 15-16 y 20-21 de abril. La primera, de clase G1, alcanzó valores de índice Dst de -60 nT el cual fue oscilando por varias horas. La segunda tormenta, de clase G4, se produjo entre el 15 y 16 de abril, alcanzó valores de -125 nT y fue ocasionada por la llegada de múltiples eyecciones de masa coronal que produjo el sol el día 13 de abril[8]. Finalmente, la tercera tormenta de clase G1 sobrepasó los -60 nT, pero esta perturbación en el índice Dst solo duró 3 horas a diferencia de la primera tormenta del mes.

La tormenta más intensa del mes, de clase G4, ocurrida el 15-16 de abril 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 09:00 horas (14:00 horas UTC) se observa un decremento en las mediciones hasta alcanzar valores negativos de -60 nT a las 10:00 horas (15:00 horas UTC), y luego empieza a oscilar alcanzando otro mínimo de -120 nT pasadas las 16:00 horas (21:00 horas UTC).

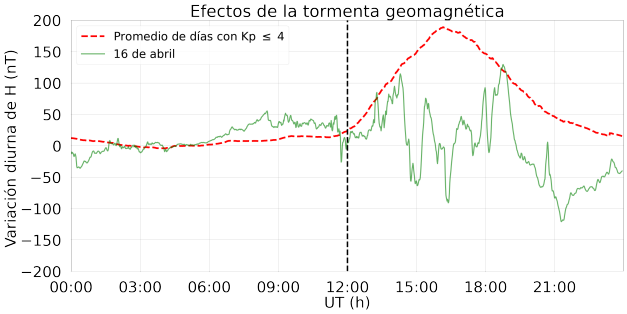

Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 16 de abril, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca. La línea vertical negra indica la hora a la cual la tormenta alcanzó la clase G4.

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). A las 10:00 horas se registró un valor inusual cercano a cero (curva verde) y que luego comenzó a oscilar de positivo a negativo, lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos (curva roja). Además, a las 14:00 horas se registró un valor de 45 m/s, el cuádruple que el valor durante los días tranquilos.

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 10 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 inician a las 09:00 horas y desaparecen pasadas las 15:30 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, excepto por la máxima altura de aparición la cual ocurrió 5 km por encima de lo esperado.

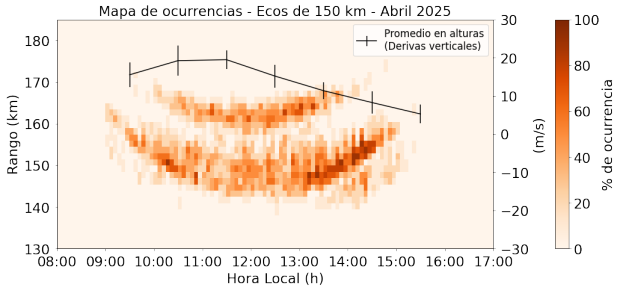

Figura 7. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

En cuanto a las derivas verticales de plasma, se realizaron 22 días (9 días completos y 13 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 -24 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 23 m/s a las 10:00 horas.

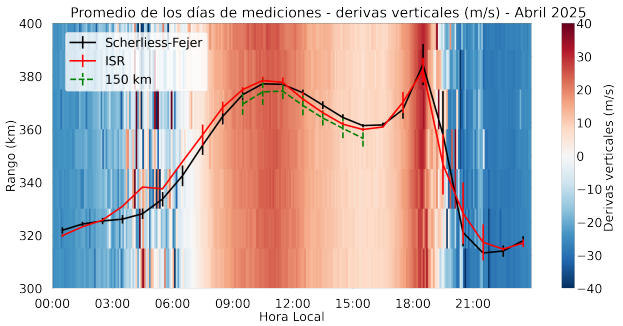

Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de enero. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Posteriormente descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[6], alcanzando valores cercanos a los 26 m/s (Figura 8). Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben gran concordancia con las mediciones.

Asimismo, se realizaron 19 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual se observó la presencia de 5 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 700 km de altura. Las morfologías dominantes fueron la de tipo Pluma de radar y Bottom-type, con 40 % de ocurrencia cada una, y la de menor ocurrencia fue la de tipo Bottom-type con 20 %, como se aprecia en la Figura 9. Además, el sistema del radar principal en su modo JULIA-MP funcionó durante 22 noches, durante las cuales se detectaron 13 irregularidades entre los 200 km y los 700 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Bottom-type, con 54 %, seguida por la del tipo Pluma de radar, con un 31 % y Bottomside, con 15 %, 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 principal en su modo JULIA-MP logró detectar irregularidades probablemente por su frecuencia de operación (50 MHz) diferente a la del radar 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].

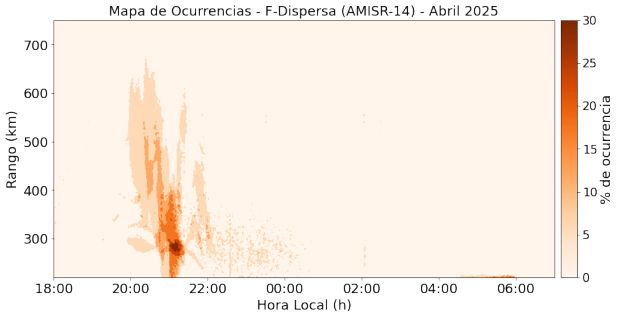

Figura 9. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

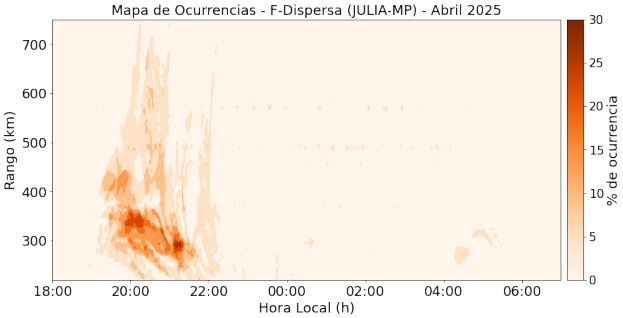

Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de abril, como se aprecia en la Figura 11, 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 +8.9 m/s a las 13:00 horas y el promedio mínimo de -44.7 m/s a las 01:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +57.6 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -75.1 m/s a las 03:00 horas. El viento zonal máximo fue de +70.3 m/s a las 15:45 horas del día 07 de abril y el mínimo -85.3 m/s a las 01:15 horas del día 04 de abril, mientras que el viento meridional máximo fue +117.3 m/s a las 18:45 horas del día 07 de abril y el mínimo -136.9 m/s a las 03:15 horas del día 11 de abril.

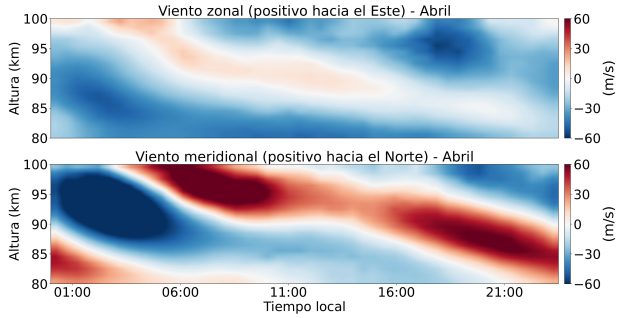

Figura 11. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

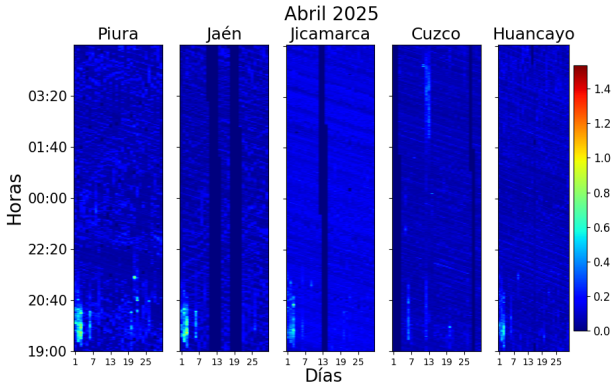

Figura 12. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca, Cuzco y Huancayo durante el mes de abril. Se observa una actividad moderada y alta.

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca, Cuzco y Huancayo se muestran en la Figura 12. Durante el periodo de estudio se observaron valores bajos, moderados y altos entre las 19:00 y 21:00 horas durante los primeros días del mes excepto para la estación de Cuzco donde no se observa actividad. La mayor actividad del mes ($\Delta S4_{mx}$=1.02) se produjo en la estación de Jaén el día 3 a las 19:40 horas aproximadamente.

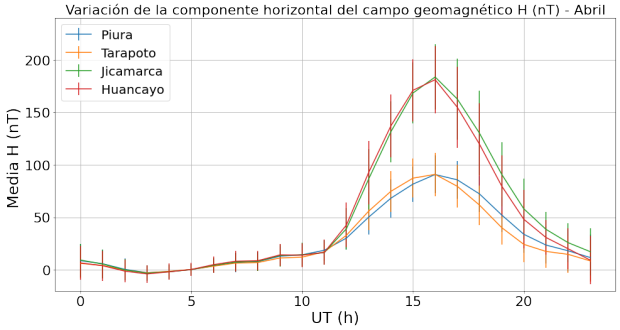

Figura 13. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de abril.

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 abril de H por cada estación: Piura, 91 nT; Tarapoto, 91 nT; Huancayo, 181 nT y Jicamarca, 184 nT.

5. Conclusiones

- Se registraron valores inusuales cercanos a cero en las derivas verticales ISR a las 10:00 horas y 11:30 horas. Además, se observaron valores de 45 m/s a las 14:00 horas, lo cual difiere con el promedio de los días tranquilos.
- A excepción de la estación de Cuzco, el índice S4 muestra alta actividad antes de la medianoche y durante los primeros días de abril. Además, el horario de actividad concuerda con la mayoría de las irregularidades observadas por los sistemas AMISR-14 y JULIA-MP.

6. Referencias

[1] R. F. Woodman, D. T. Farley, B. B. Balsley, and M. A. Milla, "The early history of the jicamarca radio observatory and the incoherent scatter technique," vol. 10, no. 2.

[2] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: 1https://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: 1https://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] J. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," in Annales Geophysicae, vol. 24, no. 5. Copernicus GmbH, 2006, pp. 1305–1310.

[8] "Geomagnetic Storm WATCH for Apr 16 UTC-day," Apr. 2025. [Online]. Available: 1https://www.swpc.noaa.gov/news/g3-watch-16-apr-2025

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