



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

MAYO 2025



Durante el mes de mayo de 2025 fuimos testigos de 3 tormentas geomagnéticas, la primera con una intensidad de G1, y las dos últimas con intensidad de G3. La tercera tormenta fue la más duradera del mes y ocurrió entre el 28 y 29 de mayo, la cual tuvo un impacto significativo en las mediciones de las derivas verticales de plasma (Figura 1), en donde durante la noche se registraron inusuales valores positivos, mientras que durante el día se observaron inusuales velocidades negativas, todas oscilando de positivo a negativo durante la duración de la tormenta. Además, el día 29 de mayo se registraron valores negativos durante las horas del pre-reversal enhancement, a diferencia de los días geomagnéticamente tranquilos en donde en promedio alcanza los 5 m/s.

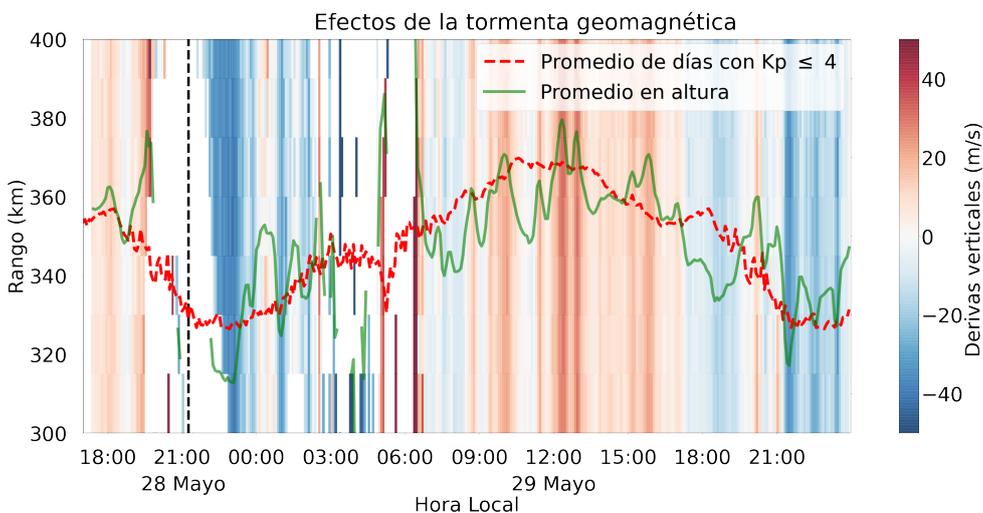


Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 28-29 de mayo, sobre las derivas verticales ISR. La línea vertical negra indica la hora a la cual la tormenta alcanzó la clase G3.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de mayo 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: 125	TPP: 66	Mín.	Máx.
Mín: 64.4 S	Mín: 2.8 O	HYO: 123	PIU: 68	-22	18
Máx: 19.0 N	Máx: 18.9 E				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA A: 11 % M: 20 % T: 69 %				ACTIVIDAD SOLAR: MODERADA A: 32 % M: 68 % B: 0 %	

Tormentas geomagnéticas

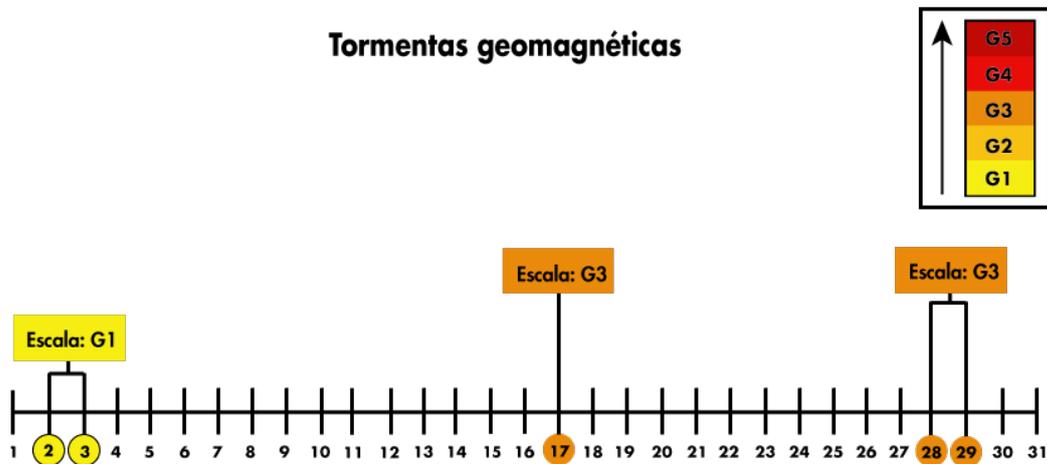


Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de mayo.

¿SABÍAS QUÉ?

A pesar de que mediciones de dispersión incoherente habían sido realizadas desde 1961 en el Radio Observatorio de Jicamarca, recién en el año 1964 se pudo establecer un método estándar para la estimación de parámetros ionosféricos como la densidad de electrones, temperatura de electrones, la relación entre temperatura de electrones e iones (T_e/T_i), y la composición de los principales componentes iónicos de la ionósfera (O^+ , He^+ , H^+)[1].

A finales de mayo de 1964 se realizó la primera campaña de 48 horas seguidas de mediciones para estimar las densidades de electrones.

Los resultados del primer día de esta campaña se muestran en la Figura 3, donde se observa la evolución temporal y en altura de la densidad de electrones.

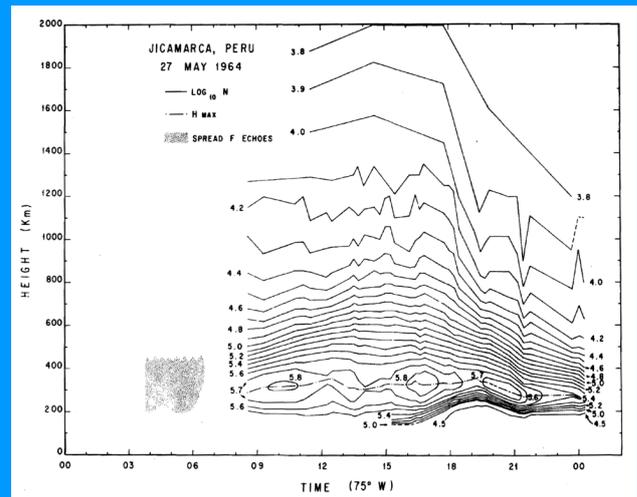


Figura 3. Curvas de nivel de densidades de electrones en función de altura y hora local, medidas el 27 de mayo de 1964. Imagen extraída de Woodman et al., 2019[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice K_p [2]) fue predominantemente tranquila en un 69% del tiempo, moderada en un 20% y alta en un 11%; por otro lado, la actividad solar (índice $F10.7$ [10]) fue alta un 32% del tiempo y 68% 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)[3], lo que se refleja en nuestras mediciones.

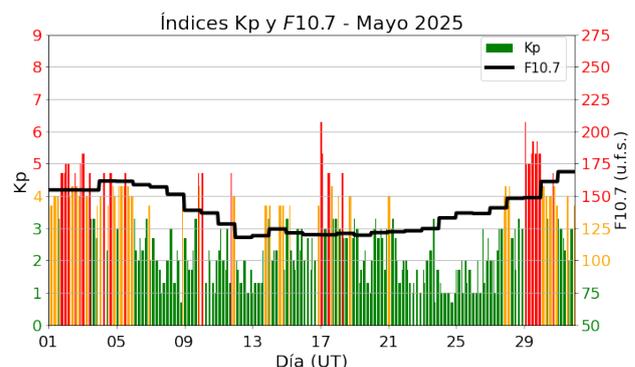


Figura 4. Valores de los índices K_p y $F10.7$ cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$) para el mes de mayo. Extraídos de OMNIWeb.

Para los meses cercanos al solsticio de junio (mayo, junio, julio), en un régimen de actividad solar moderada o alta, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea baja, menor al 20 % [4]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de mayo para un régimen de actividad solar moderada (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 -20 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 19 m/s a las 11:00 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 [5], hasta 9 m/s a las 17:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -22 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran moderada concordancia con las mediciones.

Estudios climatológicos [6] indican que cerca a los meses del solsticio de junio los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 09:00 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 135 km y los 165 km de altura. En este periodo, encontramos que la mínima y la máxima altura de aparición fueron mayores en 5 km que lo esperado. Además, la hora de aparición de estas irregularidades ocurre media hora antes, mientras que la hora de desaparición ocurre media hora después de lo esperado.

2. Tormentas geomagnéticas

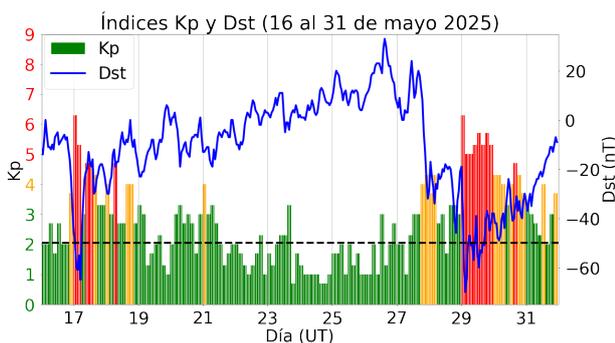


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 16 al 31 de mayo. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La alta actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 3 tormentas geomagnéticas, las cuales acontecieron los días 2-3, 17 y 28-29 de mayo. La primera fue de clase G1, mientras que la segunda y tercera fueron de clase G3 (Figura 5). La tormenta del 17 de mayo alcanzó valores de índice Dst de -65 nT y fue ocasionada por una eyección de masa coronal emitida

el 12 de mayo [7]. Además, la tormenta del 28-29 de mayo alcanzó los -70 nT de índice Dst, fue la que más duró en el mes y fue ocasionada por una región de interacción corrotante [8].

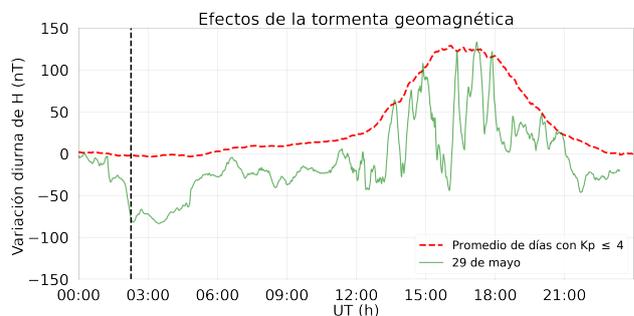


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 29 de mayo, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca. La línea vertical negra indica la hora a la cual la tormenta alcanzó la clase G3

La tormenta más intensa (G3) y duradera del mes, ocurrida el 28-29 de mayo 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 19:00 horas del día 28 de mayo (00:00 horas UTC del día 29 de mayo) se observa un decremento en las mediciones hasta alcanzar valores negativos de -80 nT de H a las 21:16 horas del día 28 de mayo (02:16 horas UTC del día 29 de mayo), y luego empieza a oscilar durante el resto del día alcanzando valores negativos durante la mañana a diferencia de los días tranquilos donde solo se registraron valores positivos.

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 partir de las 19:00 horas del día 28 de mayo se registraron velocidades positivas (curva verde) lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos (curva roja) y que luego no se pudieron estimar hasta antes de la medianoche debido a la ocurrencia de la F-Dispersa. Además, durante el día 29 de mayo se registraron valores negativos durante la mañana y positivos durante la noche lo cual difiere con el valor promedio de los días tranquilos. Además, durante este día no se observó la ocurrencia del pre-reversal enhancement.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

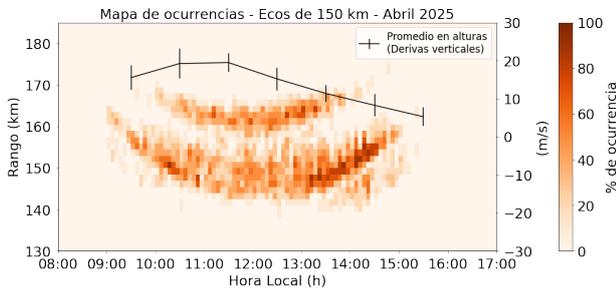


Figura 7. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 13 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 08:30 horas y desaparecen pasadas las 16:00 horas, además éstos están contenidos entre los 140 km y los 170 km de altura, lo que difiere moderadamente con lo predicho por la climatología (realizada con el modo JULIA[6]) debido a que las mediciones superaron en 5 km la mínima y la máxima altura de aparición, y los ecos aparecieron media hora antes y desaparecieron media hora después que lo esperado.

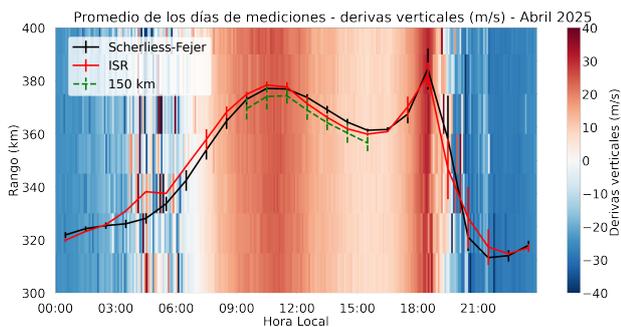


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de mayo. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

En cuanto a las derivas verticales de plasma, se realizaron 23 días (13 días completos y 10 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 -19 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 18 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 17:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[5], alcanzando valores cercanos a los 5 m/s (Figura 8). Luego, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones. Finalmente, las derivas diurnas ISR fueron mayores que las derivas de los Ecos de 150 km y muestran en promedio una diferencia de 2.28 m/s.

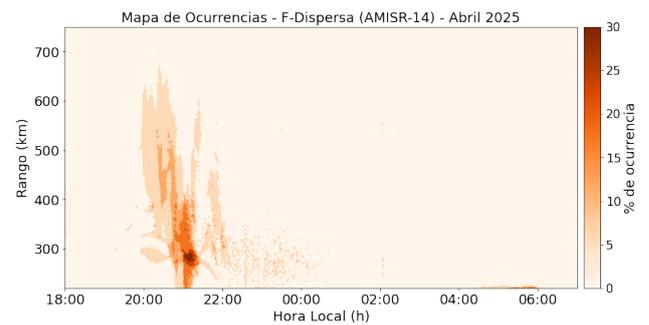


Figura 9. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar AMISR-14.

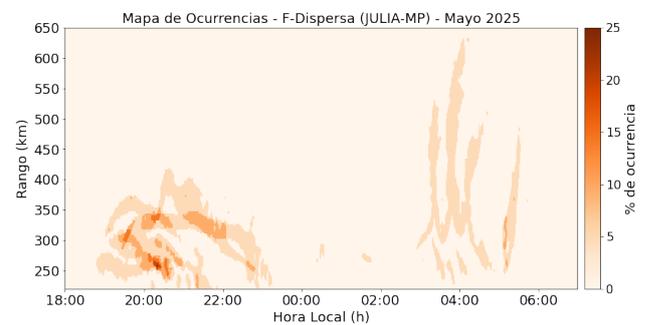


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar principal en su modo JULIA-MP.

Asimismo, se realizaron 16 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[8], periodo durante el cual se observó la presencia de 4 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 550 km de altura. La morfología dominante fue la de tipo Bottom-type, con 75 %, y la de menor ocurrencia fue la de tipo Post-midnight con 25 %, 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 8 irregularidades entre los 200 km y los 650 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Bottom-type, con 74 %, seguida por las del tipo Post-midnight y Pluma de radar con 13 % 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 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)[4].

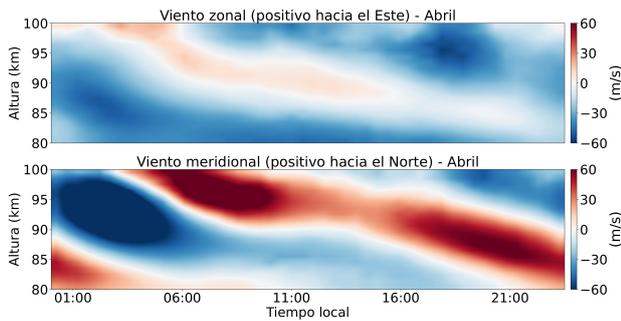


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de mayo del 2025.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de mayo, 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 +18.9 m/s a las 08:30 horas y el promedio mínimo de -2.8 m/s a las 03:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +19.0 m/s a las 09:30 horas y el promedio mínimo de -64.6 m/s a las 03:00 horas. El viento zonal máximo fue de +93.7 m/s a las 09:45 horas del día 06 de mayo y el mínimo -81.9 m/s a las 21:15 horas del día 18 de mayo, mientras que el viento meridional máximo fue +107.3 m/s a las 07:15 horas del día 09 de mayo y el mínimo -123.2 m/s a las 02:15 horas del día 08 de mayo.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca y Huancayo se muestran en la Figura 12. Durante el periodo de estudio se observaron valores bajos y moderados entre las 19:00 y 22:00 horas. Los valores moderados ocurrieron los días 17 y 28-29 de mayo que coinciden con los días cuando ocurrieron tormentas geomagnéticas. La mayor actividad del mes ($\Delta S4_{m.x}=0.42$) se produjo en la estación de Piura el día 28 a las 21:20 horas aproximadamente.

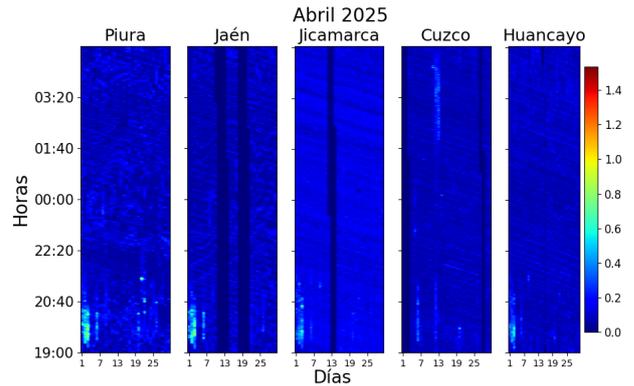


Figura 12. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca y Huancayo durante el mes de mayo. Se observa una actividad moderada.

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 mayo de H por cada estación: Piura, 68 nT; Tarapoto, 66 nT; Huancayo, 123 nT y Jicamarca, 125 nT.

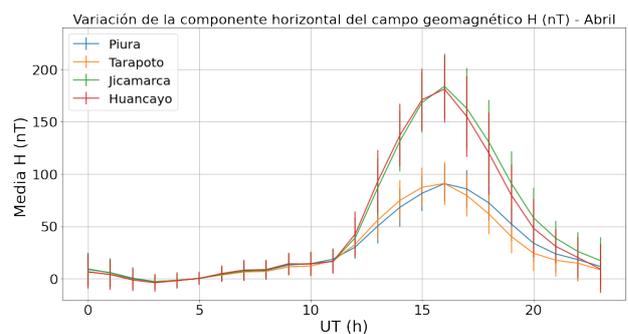


Figura 13. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de mayo.

5. Conclusiones

- Durante la tormenta del 28-29 de mayo se registraron fluctuaciones en las derivas de plasma, generando velocidades positivas durante la noche y negativas durante el día, lo cual difiere con el promedio de los días geomagnéticamente tranquilos.

- El índice S4 muestra moderada actividad antes de la medianoche durante los días de tormentas geomagnéticas y solo la estación de Piura muestra actividad moderada los primeros días de mayo. Además, la actividad baja-moderada se correlaciona con lo observado por los sistemas AMISR-14, JULIA-MP y con lo esperado por la climatología.

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: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] "SURPRISE GEOMAGNETIC STORM," Apr. 2025, [Online; accessed 19. jun. 2025]. [Online]. Available: <https://spaceweather.com/archive.php?day=17&month=05&year=2025&view=view>
- [8] "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

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