



# LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

FEBRERO 2024



Durante el mes de febrero de 2024 fuimos testigos de un incremento de actividad solar a medida que nos acercamos al máximo del presente ciclo solar(25). Es así que se registró una alta incidencia de llamaradas solares de clase X, incluyendo la más intensa de lo que va del ciclo solar 25 (X6.3)[1], como se puede apreciar en la [Figura 1](#). Entre los efectos de esta llamarada podemos mencionar la aparición de un crochet magnético[2] en las mediciones de campo geomagnético en nuestras estaciones más cercanas al ecuador magnético ([Figura 5](#)) y la absorción de señales en la capa D[3] presente en los ionogramas adquiridos en el Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto geofísico del Perú (IGP- ROJ), como se muestra en la [Figura 6](#).

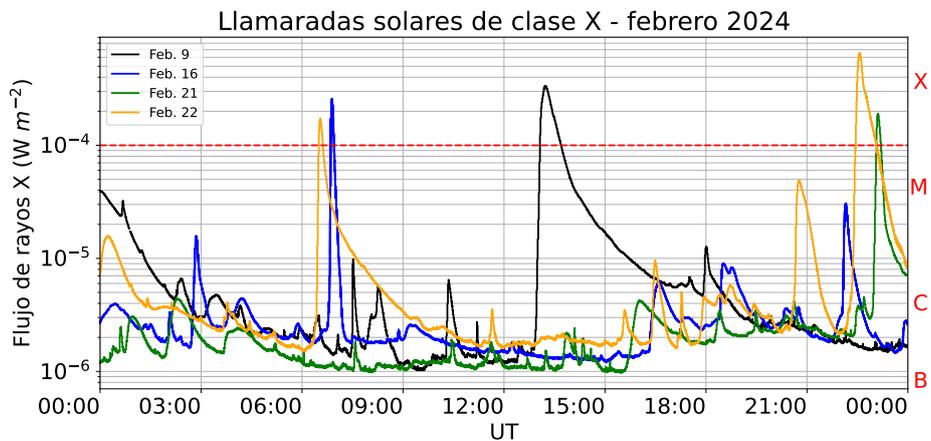


Figura 1. Llamaradas de clase X acontecidas durante el mes de febrero del 2024. Datos extraídos de la base de datos de la misión satelital GOES-16[4].

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de febrero del 2024.

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:132	AQP:81	Mín.	Máx.
Mín: 35.8 S	Mín: 18.7 O	HYO: 121	NZC: 74	-30	40
Máx: 38.6 N	Máx: 6.4 E	PIU: 81			
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: <b>TRANQUILA</b>			ACTIVIDAD SOLAR: <b>ALTA</b>		

## ¿SABÍAS QUÉ?

Nos estamos acercando al máximo del presente ciclo solar (predicho para julio del 2025[5]), lo que trae consigo un incremento en la radiación solar incidente en la ionosfera y, por ende, una mayor densidad de electrones, como se manifiesta en el ionograma mostrado en la Figura 4[6]. Por otro lado, el aumento de la actividad solar también conlleva una mayor ocurrencia de llamaradas solares de clase X, las más intensas de todas. Este comportamiento se exhibe en la Figura 2, donde se muestra el número mensual de llamaradas clase X para los ciclos solares 23 y 24. Si bien las llamaradas solares emiten radiación en todo el espectro electromagnético, son las emisiones de rayos X ( $\lambda < 10$  nm) y UV ( $\lambda < 200$  nm) las que las identifican, ya que los primeros aumentan en un factor de 10 o más durante una llamarada solar, mientras que los segundos lo hacen en un 10%. Es así que la clasificación de las llamaradas se basa en las mediciones del sensor de rayos-X de GOES[6] (GOES XRS) en el rango entre 0.1 nm y 0.8 nm, consta de una letra y un número. De este modo la letra se refiere a una potencia negativa de 10 para el

pico de la irradiancia: A ( $10^{-8} \text{ W/m}^2$ ), B ( $10^{-7} \text{ W/m}^2$ ), C ( $10^{-6} \text{ W/m}^2$ ), M ( $10^{-5} \text{ W/m}^2$ ) y X ( $10^{-4} \text{ W/m}^2$ ), y el número (menor a 10) es el coeficiente que acompaña a la potencia de 10[7]. Por ejemplo, una llamarada de clase X1.7 significa que su pico de emisión entre los 0.1 nm y 0.8 nm fue de  $1.7 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ .

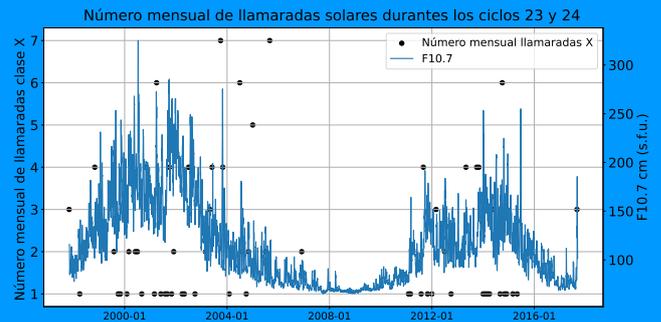


Figura 2. Número mensual de llamaradas solares de clase X durante los ciclos solares 23 y 24. Datos extraídos de "Characteristics of X-class flares of solar cycles 23 and 24 in X-ray and EUV bands". Adv. Space Res., 71(12) (2023)[7].

## 1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[8]) fue predominantemente tranquila en un 98% del tiempo, moderada en un 1% y alta en un 1%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[9]) fue alta un 86% del tiempo y 14% moderada (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)[10], lo que se refleja en nuestras mediciones.

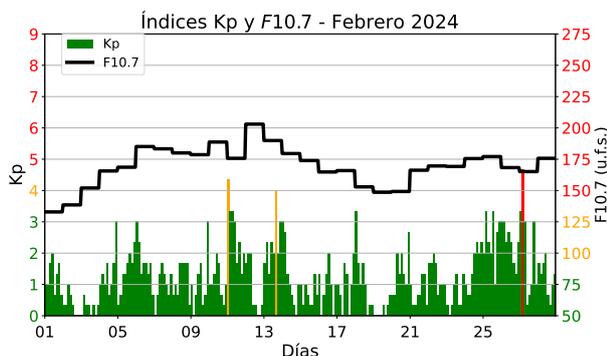


Figura 3. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. =  $10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ) para el mes de febrero. Extraídos de OMNIWeb [11].

Para los meses cercanos al equinoccio de marzo, en un régimen de actividad solar alta o moderada, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea mayor para el intervalo de tiempo anterior a la medianoche, entre los 250 y 600 km de altura. Por otro lado, se espera una muy baja incidencia de eventos posteriores a la medianoche[12]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de febrero para un régimen de actividad solar alta o 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 15 m/s a las 10:30 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 7 m/s a las 17:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[13], hasta cerca de 25 m/s a las 19:30 horas, para finalmente decrecer hasta los -20 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran una moderada concordancia con las mediciones salvo para las horas circundantes a la ocurrencia de pre-reversal enhancement.

Estudios climatológicos[14] indican que cerca a los meses del equinoccio de marzo los Ecos de

150 km aparecen alrededor de las 9 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 140 km y los 165 km de altura. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

## 2. Aumento de la actividad solar

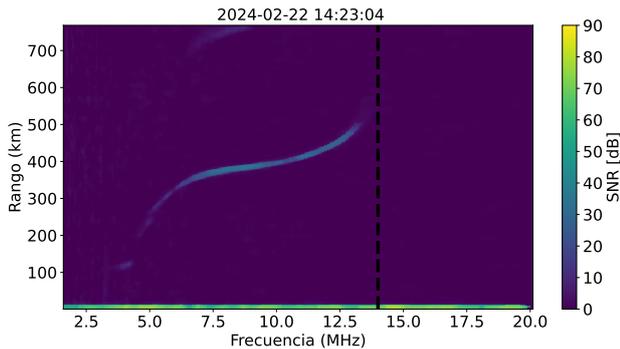


Figura 4. Ionograma donde se muestra que las frecuencias de plasma medidas por la ionosonda incrementaron hasta pasar los 14 MHz, consecuencia de un aumento de la densidad de electrones en la atmósfera debido a la mayor radiación solar.

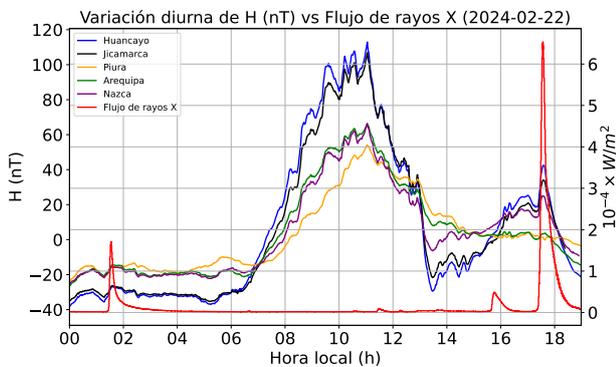


Figura 5. Crochet magnético producido por la llamarada solar de clase X6.3 acontecida el 22 de febrero en las estaciones más cercanas al ecuador magnético.

El constante aumento de la actividad solar a medida que nos acercamos al máximo del presente ciclo solar se manifiesta de muchas maneras, entre las que listamos el aumento de la densidad de electrones en la ionósfera y la mayor incidencia de llamaradas solares de clase X. El primer caso es apreciable en los trazos de los ionogramas pasadas las 10 AM, como se muestra en la Figura 4, los cuales típicamente se encuentran entre los 3 MHz y los 12 MHz durante periodos de actividad solar baja, pero al aumentar la actividad solar también lo hace la densidad de electrones y, por consiguiente, la frecuencia de plasma. Asimismo, la

ionización adicional en la ionosfera producida por la llamarada solar del 22 de febrero, la más intensa del presente ciclo solar, conllevó la aparición de corrientes extra que, a su vez, incrementaron los valores de las mediciones de H sobre nuestros magnetómetros más cercanos al ecuador magnético (Jicamarca, Huancayo y Nazca), dando lugar a un crochet magnético[2], como se puede apreciar en la Figura 5. Además, esta llamarada también produjo la absorción de parte de las señales emitidas por la ionosonda[3], como se aprecia en la Figura 6.

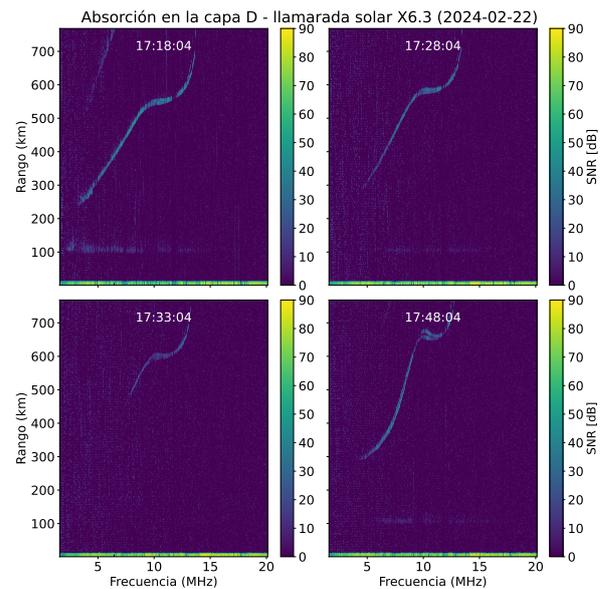


Figura 6. Desaparición temporal de los ecos detectados por la ionosonda debido a la absorción en la capa D ocasionada por la llamarada solar de clase X6.3 del 22 de febrero, la más intensa en el presente ciclo solar hasta ahora.

## 3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales de plasma entre los 300 y 400 km de altura con el uso del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ) con el modo JULIA MP y durante la campaña de soporte a satélites (del 15 al 19 de febrero), como se muestra en la Figura 7. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -30 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para disminuir hasta -33 m/s a las 04:30 horas. Posteriormente, los valores de las derivas aumentaron hasta cambiar de dirección (hacia arriba) un poco antes de las 08:00 horas. Luego, incrementaron hasta llegar a un valor cercano a 10 m/s a las 11:30 horas. Posteriormente, descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 19:30 horas conocido como pre-reversal

enhancement[13], con valores cercanos a los 40 m/s. Las estimaciones posteriores a esta hora se vieron contaminadas por la incidencia de F-Dispersa, por lo que no se muestran. Los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones. Además, la campaña de soporte a la dinámica del Sudden Stratospheric Warming (SSW) incluyó las estimaciones de la densidad de electrones en la capa F, siendo la densidad máxima de  $3.2 \times 10^{12}$  acontecida el 15 de febrero a las 12:25 hora local, como se aprecia en la Figura 8.

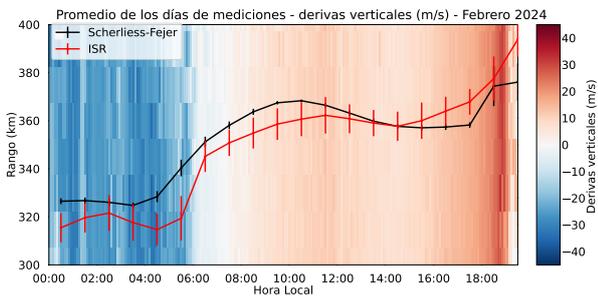


Figura 7. Promedio de las derivas verticales ISR para los días de febrero. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

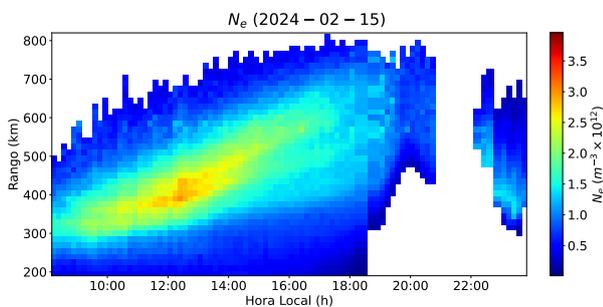


Figura 8. Densidad de electrones correspondiente al 15 de febrero.

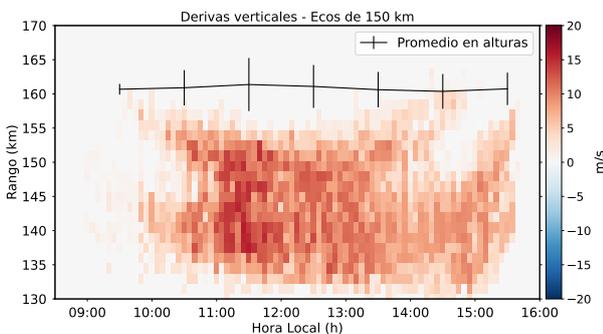


Figura 9. Promedio de las derivas verticales de los Ecos de 150 km.

Por otro lado, se realizaron 14 días de mediciones de

las derivas verticales de los Ecos de 150 km, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en la Figura 9 que los ecos empiezan desde un poco antes de las 09:00 horas, que desaparecen alrededor de las 15:30 horas y que están contenidos entre los 130 km y los 165 km de altura, lo que concuerda con lo predicho por la climatología.

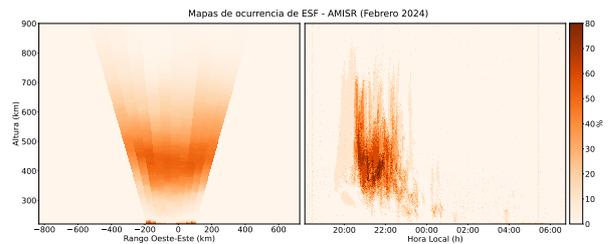


Figura 10. Derecha: Mapa de ocurrencias tradicional. Izquierda: mapa de ocurrencias polar.

Asimismo, se realizaron 10 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual se observó la presencia de 10 irregularidades en la Capa F en 10 noches, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la del tipo Pluma de Radar, con un 80 % de ocurrencia, secundada por los tipos Bottom-type y Post-midnight, con 10 % cada uno, como se aprecia en la Figura 10. Estas observaciones concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[12].

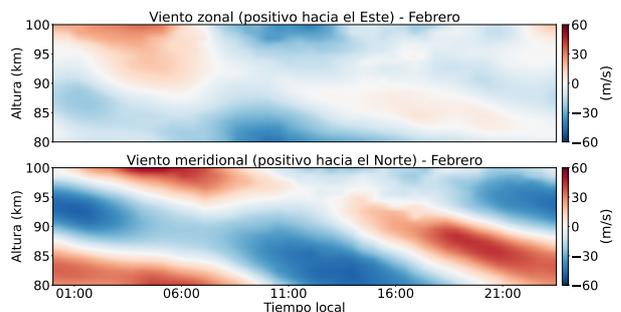


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de febrero del 2024.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de febrero, como se aprecia en la Figura 8, muestra periodos predominantes de 12 horas y 24 horas (marea solar semidiurna y diurna respectivamente). En la mesopausa ( $\sim 90$  km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de +6.4 m/s a las 05:00 horas y el promedio mínimo de -18.7 m/s a la 01:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +38.6 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -35.8 m/s a las 01:30 horas. El viento zonal máximo fue de +83.9 m/s a las 20:15 horas del día 08 de

febrero y el mínimo -97.2 m/s a las 08:45 horas del día 18 de febrero, mientras que el viento meridional máximo fue 93.9 m/s a las 16:15 horas del día 03 de febrero y el mínimo -93.2 m/s a las 12:45 horas del día 07 de febrero.

#### 4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

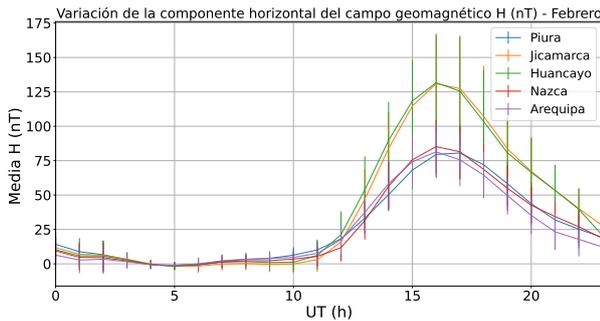


Figura 12. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de febrero del 2024.

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ se presentan en la Figura 12. Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron muy 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, 81 nT; Huancayo, 131 nT; Jicamarca, 132 nT; Arequipa, 81 nT y Nazca, 85 nT.

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Jaén, Jicamarca, Universidad Católica del Perú (Lima) y Cuzco se muestran en la Figura 13. Durante el período de estudio se observaron valores bajos, moderados y altos de S4. La mayor actividad del mes ( $S4_{m\acute{a}x}=1.4$ ) se produjo en la estación de Cuzco el día 25 a las 00:27 horas aproximadamente. Notamos que entre los días 21 y 26 de febrero, en el periodo comprendido entre las 3:00 AM y las 4:00 AM aproximadamente, se registró actividad moderada de cintilaciones en todas nuestras estaciones, con la excepción de Cuzco. Esto podría deberse a que las irregularidades que causaron las cintilaciones vistas en las estaciones de Jaén, Jicamarca y U. Católica no estuvieron contenidas en la línea de vista entre el receptor ubicado en Cuzco y el satélite.

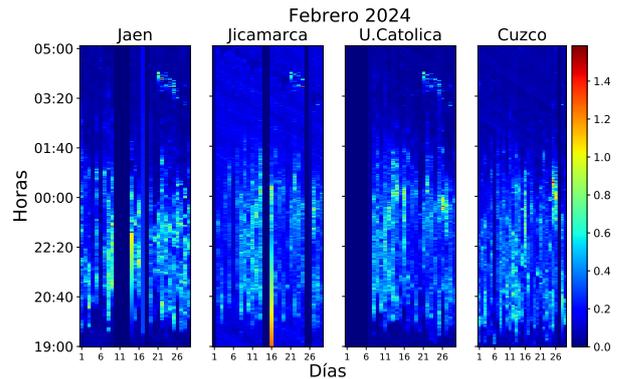


Figura 13. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Jaén, Jicamarca, Universidad Católica del Perú y Cuzco durante el mes de febrero. Se observa actividad moderada y alta.

#### 5. Conclusiones

- Se registró una alta ocurrencia de llamaradas solares de clase X como consecuencia de la cercanía del máximo del presente ciclo solar.
- Se observaron un crochet magnético y absorción en la capa D como efectos de la llamarada solar más intensa (X6.3, ocurrida el 22 de febrero a las 22:34 UT) en lo que va del presente ciclo solar.
- Se reportaron valores bajos, moderados y altos de actividad de cintilaciones, siendo el valor más alto de 1.4, que se produjo en la estación de Cuzco, el día 25 a las 00:27 horas aproximadamente.

#### 6. Referencias

- [1] "X6.3 solar flare," Mar. 2024, [Online; accessed 21 Mar. 2024]. [Online]. Available: [1www.spaceweatherlive.com/en/news/view/524/20240222-x6-3-solar-flare.html](http://www.spaceweatherlive.com/en/news/view/524/20240222-x6-3-solar-flare.html).
- [2] J. J. Curto, "Geomagnetic solar flare effects: a review. J. Space Weather Space Clim," 2020. [Online]. Available: [1doi:10.27.doi:10,1051/swsc/20200271](https://doi.org/10.1051/swsc/20200271)
- [3] "Instituto geofísico del Perú, "realtime at jicamarca," Mar. 2022, [Online; accessed 21. Mar. 2024]. [Online]. Available: [1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin\\_Marzo\\_2022.pdf](https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Marzo_2022.pdf)
- [4] "Index of/platforms/solar-space-observing-satellites/goes," Mar 2024, Accessed on: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: [1https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/](https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/)

- [5] N. W. Service, "Hello Solar Cycle 25. NOAA's National Weather Service." 2020. [Online]. Available: [1https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle](https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle)
- [6] D. J. Gorney, "Solar cycle effects on the near-earth space environment," vol. 28(3), p. 315–336, 1990. [Online]. Available: [1doi:10,1029/RG028i003p00315](https://doi.org/10.1029/RG028i003p00315)
- [7] K. Pandey, D. Chakrabarty, A. Kumar, A. Bhardwaj, S. Biswal, G. C. Hussey, and A. K. Yadav, "Characteristics of x-class flares of solar cycles 23 and 24 in x-ray and euv bands." vol. 71(12)), p. 5438–5452, 2023. [Online]. Available: [1doi:10,1016/j.asr,2023,02,022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.022)
- [8] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [1https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html](https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html)
- [9] "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)
- [10] 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.
- [11] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: [1https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] J. L. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," Ann. Geophys., p. 1305–1310, 2006.

**Elaborado por:**

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

**Diseño y diagramación:**

Bach. Anette De la Cruz Meza

**Colaboradores:**

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

**Contacto:**

[roj@igp.gob.pe](mailto:roj@igp.gob.pe)