



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres " "Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

BOLETÍN IGP / ROJ / 2024-03

LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

MARZO 2024



Durante el mes de marzo de 2024 fuimos testigos de la ocurrencia de múltiples tormentas geomagnéticas. La de mayor intensidad (G4) del presente ciclo solar ocurrió el día 24 de marzo, la cual produjo perturbaciones en el campo magnético como se visualiza en la diferencia del campo magnético horizontal entre las estaciones de Jicamarca y Piura, así como el decremento del índice Dst hasta valores cercanos a -120 nT como se aprecia en la Figura 1. Por otro lado, la fulguración solar de clase X1.1 acontecida el 28 de marzo provocó la absorción de señales en la capa D emitidas por la ionosonda (Figura 6).



Figura 1. Tormentas geomagnéticas del 21 y del 23 al 25 de marzo. Panel superior: valores de _{ROJ-Piura} (curva azul) para los días de tormenta y los correspondientes al promedio de los 5 días más tranquilos del mes (curva negra). Panel intermedio: índices geomagnéticos Kp y Dst. Panel inferior: campo eléctrico de penetración dado por el modelo desarrollado por elCooperative Institute for Research in Environmental Sciences de la Universidad de Colorado en Boulder[ref-mode].

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

Vientos promedios MLT a 90 km [m/s]		Variación máxima		Γ	Derivas verticales de		
		de campo geomagnético			plasma promedio		
		horizontal (H)[nT]		((300 km- 400 km) [m/s]		
Meridional	Zonal	LIM:162	AQP:96		Mín.	Máx.	
Mín: 73.1 S	Mín: 42.5 O	HYO: 159	N7C: 107		-37	35	
Máx: 34.4 N	Máx: 11.6 E				•		
		PIU: 89					

¿SABÍAS QUÉ?

El efecto de penetración en el campo eléctrico ecuatorial (Prompt penetration electric field) se refiere a la rápida transmisión de los campos eléctricos de altas latitudes hacia la ionosfera ecuatorial, que puede ocurrir durante cambios en el campo magnético interplanetario (IMF) y las condiciones del viento solar. Las perturbaciones del campo eléctrico durante las tormentas geomagnéticas y subtormentas magnetosféricas, pueden afectar el campo eléctrico zonal sobre la región ecuatorial, las cuales pueden alterar la electrodinámica ionosférica ecuatorial de manera significativa, como se aprecia en la Figura 1, en donde los valores de $\Delta_{ROJ-Piura}$ son perturbados al mismo tiempo que ocurre la fluctuación repentina en la dirección de la componente Z del campo magnético interplanetario (IMF Bz) a las 14:30 horas UT para luego volver a cambiar de dirección a las 16:30 horas UT (Figura 2). El campo eléctrico zonal alterado juega un papel importante en la generación de las irregularidades del plasma en la ionosfera ecuatorial durante la noche local, lo que comúnmente se conoce como eventos de F-dispersa ecuatorial (ESF). Aunque estas perturbaciones en el momento de las tormentas son de naturaleza global, el impacto de estas perturbaciones puede tener dependencias longitudinales y estacionales. Por otro

lado, las subtormentas ocurren en la cola magnética del lado nocturno y se sabe que en muchas ocasiones están confinadas longitudinalmente. La componente zonal del campo eléctrico de la región ecuatorial F generalmente se dirige hacia el oeste (hacia el este) durante la noche (día). En condiciones geomagnéticas inactivas, este escenario no cambia excepto durante el solsticio de junio de los años de mínimo solar, cuando el campo eléctrico zonal de la región F, de manera estadísticamente significativa, gira hacia el este durante algún momento durante las horas de medianoche.



Figura 2. Fluctuaciones repentinas en la dirección del IMF Bz a las 14:30 horas y 16:30 horas UT durante el 21 de marzo.

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[1]) fue predominantemente tranquila en un 87 % del tiempo, moderada en un 8 % y alta en un 5 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[2]) fue alta un 42 % del tiempo y 58 % 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)[3], lo que se refleja en nuestras mediciones.



Figura 3. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$) para el mes de marzo. Extraídos de OMNIWeb [4].

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[5]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de marzo 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 -22 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 21 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 8 m/s a las 16:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 25 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -25 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[7] 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. En este periodo, encontramos que la mínima altura de aparición de estos ecos fue menor en 10 km y que la máxima altura de aparición fue menor en 5 km aproximadamente, mientras que el tiempo de aparición de estas irregularidades concuerda con la climatología.

2. Tormentas magnéticas y llamaradas solares

La creciente actividad solar se manifestó en la ocurrencia de las 3 tormentas geomagnéticas más intensas en lo que va del año, las cuales produjeron perturbaciones en las mediciones de nuestros magnetómetros. La primera aconteció el 3 de marzo (Figura 4), de intensidad G2, fue causada por una eyección de masa coronal (CME) emitida el 28 de febrero y asociada a una llamarada solar de clase C5.1[8]. La segunda, de intensidad G1, ocurrió el 21 de marzo y fue ocasionada por una CME emitida el 17 de marzo que, a su vez, estuvo asociada a una CME de clase M6.7[9].

Finalmente, la tercera tormenta ocurrió entre el 23 y el 25 de este mes, con intensidades G2, G4 y G1 respectivamente, siendo la más intensa del presente ciclo solar.

Por otro lado, se registró la incidencia de 2 llamaradas solares de clase X1.1. La primera acaeció el 23 de marzo a las 20:32 hora local, por lo que no pudimos apreciar sus efectos, mientras la segunda lo hizo el día 28 a las 15:29, lo que 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[10], como se puede apreciar en la Figura 5. Además, esta llamarada también produjo la absorción de parte de las señales emitidas por la ionosonda, como se aprecia en la Figura 6.



Figura 4. Tormenta geomagnética del 3 marzo. Panel superior: valores de $\Delta_{ROJ-Piura}$ (curva azul) para los días de tormenta y los correspondientes al promedio de los 5 días más tranquilos del mes (curva negra). Panel intermedio: índices geomagnéticos Kp y Dst. Panel inferior: campo eléctrico de penetración dado por el modelo desarrollado por el Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences de la Universidad de Colorado en Boulder[11].



Figura 5. Crochet magnético producido a las 15:29 horas por la llamarada solar de clase X1.1 acontecida el 28 de marzo en las estaciones más cercanas al ecuador magnético.



Figura 6. (a) Ecos típicos detectados por la ionosonda. (b) y (c) Desaparición temporal de ecos en la baja ionosfera debido a la absorción en la capa D ocasionada por la llamarada solar de clase X1.12 del 28 de marzo. (d) Detección típica de ecos luego de la llamarada.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares



Figura 7. Promedio de las derivas verticales ISR para los días de marzo. 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.

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, como se muestra en la Figura 7. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -27 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para aumentar hasta cambiar de dirección (hacia arriba) a las 07:30 horas. Luego, incrementaron hasta llegar a un valor cercano a 22 m/s a las 11:30 horas. Posteriormente, descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[6], con valores cercanos a los 35 m/s. Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 13 m/s a las 19:30 horas. Además, la campaña para la comparación de parámetros geofísicos obtenidos por el radar principal y el radar AMISR-14 incluyó estimaciones de la densidad de electrones en la capa F, siendo la densidad máxima de 2.62x10¹² acontecida el 19 de marzo a las 11:00 hora local, como se aprecia en la Figura 8.



Figura 8. Densidades de electrones obtenidas con el radar principal correspondiente al 19 de marzo..

Por otro lado, se realizaron 12 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 160 km de altura, lo que concuerda con lo predicho por la climatología.



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

Asimismo, se realizaron 22 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[12], periodo durante el cual se observó la presencia de 16 irregularidades en la Capa F en 16 noches, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la del tipo Pluma de Radar, con un 63 % de ocurrencia, secundada por los tipos Bottom-type y Bottomside, con 32 % y 6% respectivamente, como se aprecia en la Figura 10. Estas observaciones concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA).



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

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de marzo, como se aprecia en la Figura 11, muestra periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna). En la mesopausa $(\sim 90 \text{ km})$ se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de +11.6 m/s a las 13:30 horas y el promedio mínimo de -42.5 m/s a la 19:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +34.4 m/s a las 17:00 horas y el promedio mínimo de -73.1 m/s a las 02:30 horas. El viento zonal máximo fue de +97.1 m/s a las 11:45 horas del día 27 de marzo y el mínimo -114.2 m/s a las 23:15 horas del día 08 de marzo, mientras que el viento meridional máximo fue 143.1 m/s a las 11:15 horas del día 27 de marzo y el mínimo -124.6 m/s a las 04:15 horas del día 26 de marzo.



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

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

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 UT). Se registraron las máximas variaciones del promedio del mes de marzo de H por cada estación: Piura, 89 nT; Huancayo, 159 nT; Jicamarca, 162 nT; Arequipa, 96 nT y Nazca, 107 nT.



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

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 (S 4_{mx} =1.3) se produjo en la estación de Cuzco el día 1 a las 21:00 horas aproximadamente.



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

5. Conclusiones

 Se registró una alta ocurrencia de tormentas geomagnéticas que perturbaron el campo geomagnético lo cual se evidenció en la diferencia del campo magnético horizontal entre Jicamarca y Piura.

- Se observó la absorción en la capa D en las mediciones de la ionosonda como efectos de la llamarada solar de clase X1.1.
- De los 5 días de mediciones durante la campaña de estimación de densidades en la capa F se registró la máxima densidad el día 19 de marzo a las 11:00 hora local con un valor de 2.62x10¹².
- Se reportaron valores bajos, moderados y altos de actividad de cintilaciones, siendo el valor más alto de 1.3, que se produjo en la estación de Cuzco, el día 1 a las 21:00 horas aproximadamente.

6. Referencias

- "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: 1https://www.spaceweatherlive.com/en/help/ the-kp-index.html
- [2] "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
- [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] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: 1https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ form/dx1.html

- [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. L. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," Ann. Geophys., p. 1305–1310, 2006.
- [8] "Cme impact sparks g2 moderate geomagnetic storm.gnetism," https://watchers.news/2024/03/04/cmeimpact-sparks-g2-moderate-geomagnetic-storm.
- [9] "Show prediction detail," https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CME scoreboard/prediction/detail/2263.
- [10] 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
- [11] M. Williams, "Real-time model of the ionospheric electric fields - geomagnetism," https://geomag.colorado.edu/real-time-model -of-the-ionospheric-electric-fields.
- [12] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca," Aug. 2022, [Online; accessed 14. jan. 2024]. [Online]. Available: 1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radioobservatorio-jicamarca/realtime/static/reports/ 2022/Boletin_Agosto.pdf

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

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"

Elaborado por:

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