



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

JUNIO 2023



Durante el mes de junio se observaron las mediciones de una campaña para el experimento de detección de meteoros con el radar principal, como se puede observar en la [Figura 1](#). Por otro lado, se realizaron mediciones conjuntas de densidad de electrones y de derivas verticales ISR, como se aprecia en la [Figura 7](#) y en la [Figura 8](#) respectivamente. Además, pudimos registrar el efecto de dos tormentas geomagnéticas de diferentes orígenes en nuestra instrumentación ([Figura 4](#), [Figura 5](#) y [Figura 6](#)).

Ecos de un meteoro (2023/06/06)

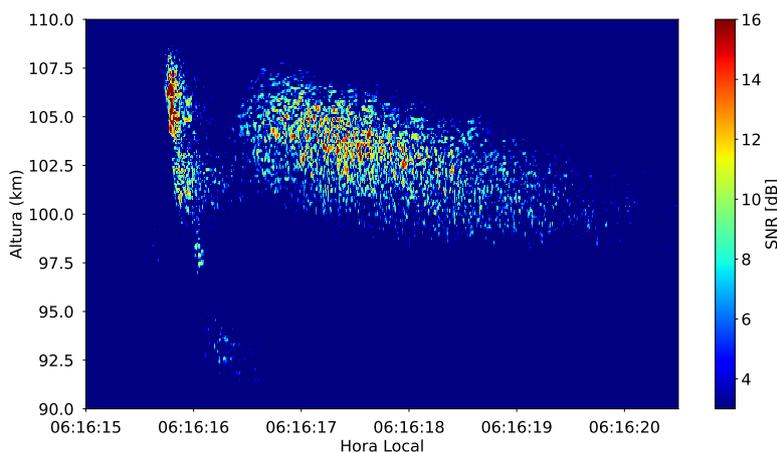


Figura 1. Relación señal a ruido (SNR) de los ecos de un meteoro. Se puede observar el eco correspondiente a la cabeza del meteoro (eco angosto a la izquierda) y el eco de la estela de ionización dejada por el meteoro (eco ancho al medio).

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de junio del 2023.

| Vientos promedio MLT a 90 km [m/s] | | Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s] | | Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H) [nT] | |
|--|-------------|--|------------------------------|--|---------|
| Meridional | Zonal | Mín | Máx | LIM: 129 | AQP: 68 |
| Mín: 60.9 S | Mín: 5.3 O | -30 | 25 | HYO: 125 | NZC: 79 |
| Máx: 16.2 N | Máx: 31.5 E | | | TAR: 71 | |
| ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA | | | ACTIVIDAD SOLAR: ALTA | | |

¿SABÍAS QUÉ?

Además de las eyecciones de masa coronal (CMEs, por sus siglas en inglés), existe otro mecanismo causante de las tormentas geomagnéticas, llamado Región de Interacción Corrotante (CIR, por sus siglas en inglés). Su origen se debe a la interacción entre un haz de viento solar de alta velocidad, causado por la aparición de agujeros coronales de baja latitud, y uno de baja velocidad a distancias lejanas al Sol, ya que se mueven casi paralelamente cerca a él, mientras que al alejarse en el espacio interplanetario, su curvatura se hace apreciable a tal punto que la componente normal de la velocidad relativa entre cada haz y el sector de frontera entre ellos alcanza valores supersónicos, lo que conlleva a la formación de 2 frentes de ondas de choque: frontal y posterior, como puede observarse en la Figura 2, en la cual se aprecia los vientos de alta velocidad (líneas moradas), los de baja velocidad (líneas azules) y el sector de frontera entre ellos (línea verde punteada). Por otro lado, este fenómeno debe su nombre a que las fuentes de ambos haces, así como también la región de interacción y la frontera entre ellos rotan a la misma velocidad que el Sol. Además, el frente de ondas de choque frontal es el que acelera al viento solar en dirección a la Tierra, que al interactuar con el campo geomagnético le transfiere energía, ocasionando

tormentas geomagnéticas, como aconteció el día 16 de este mes. Finalmente, los agujeros coronales tienden a durar varios periodos de rotación solar (27 días), por lo que producen tormentas magnéticas periódicas, mientras que las tormentas geomagnéticas producidas por una CME son esporádicas, siendo esta la mayor diferencia entre ellas[1].

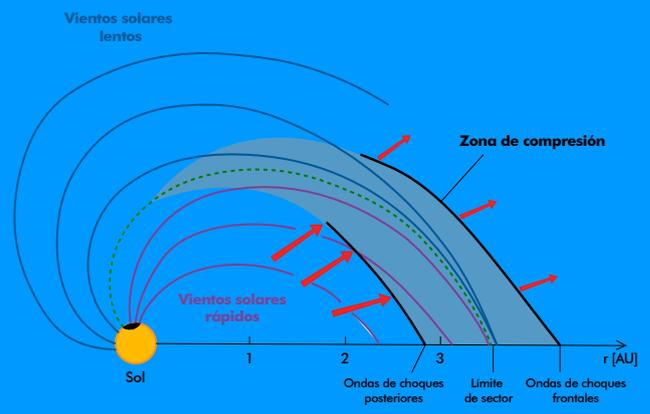


Figura 2. Representación de la formación de una CIR. El eje mostrado representa la distancia desde el Sol en unidades astronómicas (AU). Adaptado de [1].

1. Climatología del mes

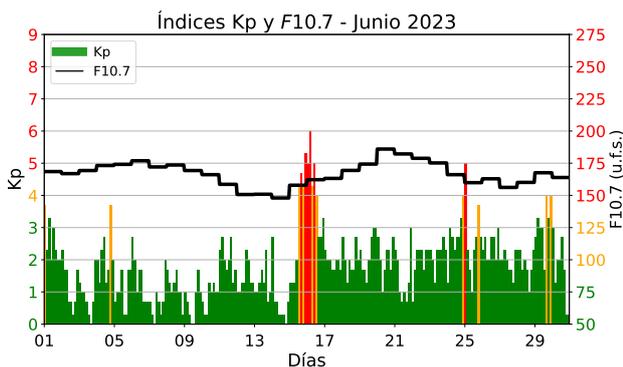


Figura 3. Los valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de junio. Extraídos de OMNIWeb [2].

La actividad geomagnética (índice Kp[3]) fue predominantemente tranquila en un 93% del tiempo, moderada en un 4% y alta en un 3%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[4]) fue moderada en un 3% del tiempo y alta en un 97% (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)[5], lo que se refleja en nuestras mediciones. Para los meses cercanos al solsticio de junio en un régimen de actividad solar alto, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea cercana a cero salvo para el intervalo de tiempo entre las 20:00 y las 21:00 horas, entre los 200 y 300 km, siendo cercana al 30%. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología[6].

La climatología de junio para un régimen de actividad solar alta (dada por el modelo de Scherliess - Fejer) indica que el promedio en altura (300 km - 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 máximo de cerca de 17 m/s un poco antes del mediodía. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 10 m/s a las 16:30 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[7], hasta cerca de 15 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -25 m/s antes de la medianoche. Las mediciones de este mes discrepan ligeramente con la climatología después de la medianoche en hasta 5 m/s, 3 m/s para las horas del día y 10 m/s a las 18:00 horas, ya que las mediciones mostraron la ausencia de pre-reversal enhancement.

2. Mes de llamaradas solares y tormentas geomagnéticas

Este mes fuimos testigos de 2 tormentas geomagnéticas de orígenes diferentes. La primera (G2), el 16 de junio, fue ocasionada por la interacción del campo geomagnético con una Región de Interacción Corrotante (¿SABÍAS QUÉ?), mientras la segunda (G1), se debió a una eyección de masa coronal (CME) que pasó cerca a la Tierra el 24 de junio a las 19:00 horas y estuvo asociada a una llamarada solar acontecida el 20 de junio de clase X1.1, con su pico a las 12:08 horas. Las perturbaciones geomagnéticas de ambas tormentas pueden apreciarse en la [Figura 4](#), mientras que los efectos de la llamarada solar del 20 de junio se manifestaron en un aumento temporal de los valores de H y del flujo de rayos X, como se muestra en la [Figura 5](#), y en la absorción de señales electromagnéticas en la capa D, como se observa en la [Figura 6](#).

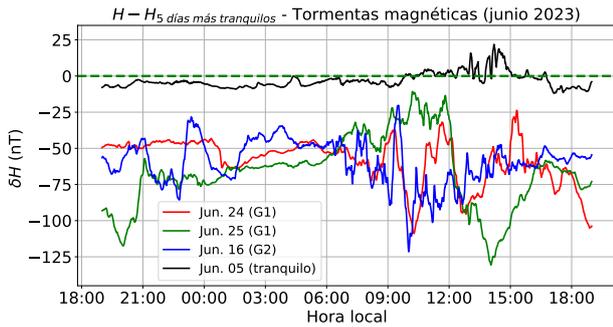


Figura 4. Perturbaciones en H ocasionadas por las tormentas geomagnéticas del 16, 24 y 25 de junio registradas en la estación de Jicamarca. La curva negra representa las perturbaciones magnéticas para un día geomagnéticamente tranquilo (5 de junio).

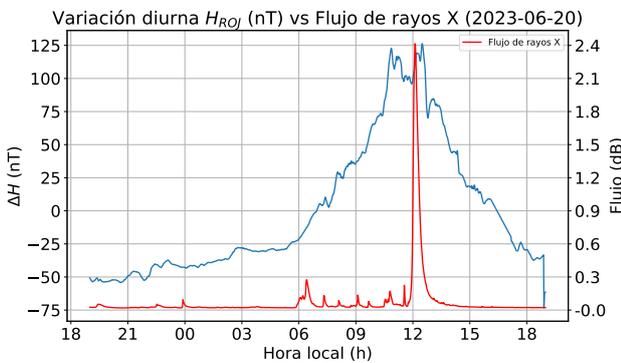


Figura 5. Aumento temporal del valor de H en la estación de Jicamarca debido a un incremento en la ionización de la ionósfera que fue ocasionada por una llamarada solar de clase X1.1.

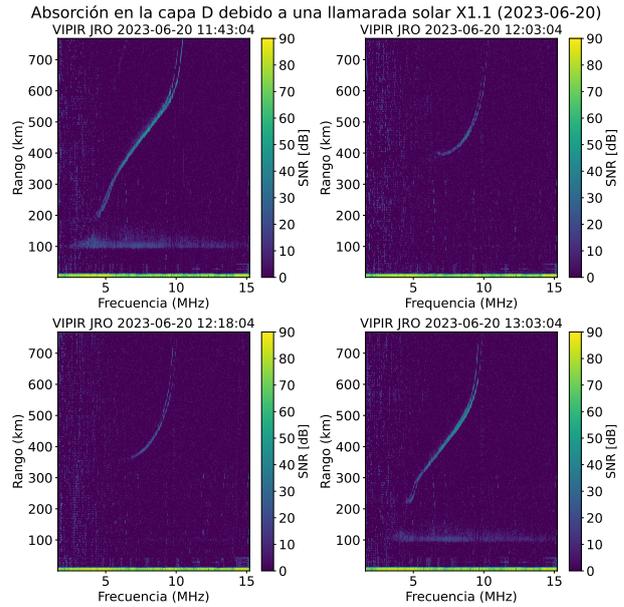


Figura 6. Absorción de señales en la capa D ocasionada por una llamarada solar de clase X1.1. Ionogramas registrados por la ionosonda de la estación de Jicamarca.

Por otro lado, mientras que la tormenta geomagnética provocada por una CME es esporádica, la tormenta ocasionada por la CIR podría ocurrir el siguiente mes, ya que el agujero coronal puede durar varios periodos de rotación solar (27 días).

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

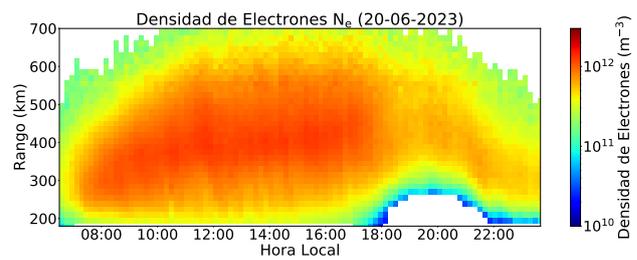


Figura 7. Densidad de electrones durante el 20 de junio del 2023. El valor máximo fue de $1.33 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ a una altura de 465 km a las 11:54 horas. Mediciones realizadas con el radar principal de Jicamarca.

Se realizaron mediciones durante 5 días para estimar la densidad de electrones con el radar principal. El día 20 se registraron valores hasta la medianoche los cuales se encontraron entre $0.36 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ y $1.33 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, estos ocurrieron en el rango comprendido entre 270 km y 465 km ([Figura 7](#)). El máximo valor durante este día ($1.33 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$) ocurrió a una altura de 465 km a las 11:54 horas. Por otro lado, la máxima densidad registrada de los

5 días de medición fue $1.45 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, y ocurrió el día 23.

Además, se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales de plasma entre los 300 km y 400 km de altura con el uso del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca del Instituto Geofísico del Perú (IGP - ROJ) en su modo JULIA - MP. (Figura 8). Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron en cerca de -18 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para inmediatamente aumentar su magnitud y cambiar de dirección (hacia arriba) cerca de las 07:00 horas. Luego, incrementaron hasta llegar a su valor pico de 18 m/s al mediodía. Posteriormente, descendieron casi monotónicamente, ya que no se observó el incremento súbito a las 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[7], predicho por la climatología. Finalmente, las derivas verticales continuaron su descenso hasta llegar a valores cercanos a -20 m/s a la medianoche. Las mediciones (curva roja) muestran una buena concordancia con las predicciones del modelo Scherliess - Fejer (curva negra), salvo por la ausencia de pre-reversal enhancement.

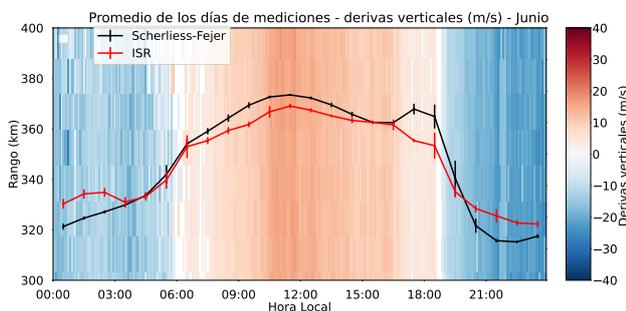


Figura 8. Promedio mensual de las derivas verticales ISR para el mes de junio. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess - Fejer.

Asimismo, se tomaron 11 días de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[8] y no se observó la presencia de ninguna burbuja de plasma. Esto concuerda con lo esperado por la climatología en casi la mayoría del tiempo y alturas.

Adicionalmente, se registró el comportamiento de los vientos zonales y meridionales para el mes de junio, como se aprecia en la Figura 9, donde se muestran 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 +31.5 m/s a las 12:30 horas y el promedio mínimo de -5.3 m/s a las 23:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +16.2 m/s a las 13:00 horas y el promedio mínimo de

-60.9 m/s a las 03:30 horas. El viento zonal máximo fue de +86.7 m/s a las 14:45 horas del día 5 de junio y el mínimo -71.9 m/s a las 22:45 horas del día 4 de junio, mientras que el viento meridional máximo fue 78.7 m/s a las 18:45 horas del día 25 de junio y el mínimo -105.4 m/s a las 05:45 horas del día 6 de junio.

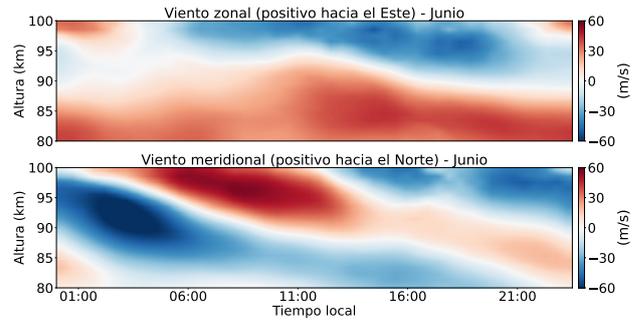


Figura 9. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de junio del 2023.

Por otro lado, se realizó un experimento con el radar principal del que pudimos realizar mediciones de trayectorias de meteoros con la finalidad de estimar la velocidad de los vientos neutros en la región de la mesosfera y baja termosfera. Si bien está basado en detectar los ecos provenientes de la reflexión de las señales emitidas por el radar por la estela de ionización dejada por el meteorito en la atmósfera al igual que SIMONE[9], este experimento provee ecos de tal potencia que no es necesario realizar promedios temporales y espaciales usados al obtener vientos con radares de meteoros especulares.

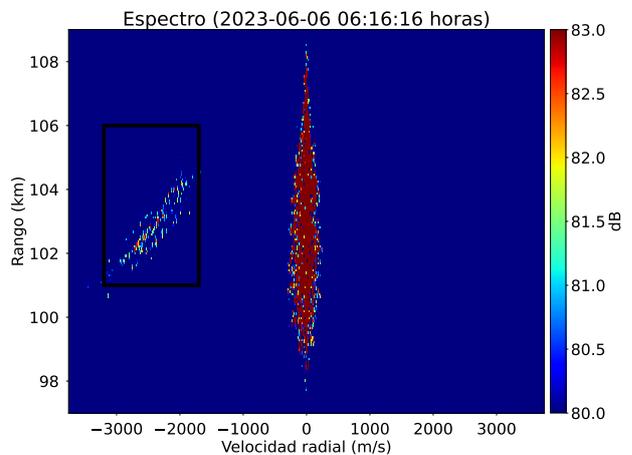


Figura 10. Espectro correspondiente a las 06:16:16 horas del 6 de junio de 2023. Se puede apreciar el eco de la cabeza del meteorito entre los 101 y 105 km de altura, encerrado en un rectángulo negro.

Podemos apreciar los trazos en tiempo y altura de los ecos reflejados en la estela de ionización dejada por un meteoro en el RTI mostrado en la [Figura 1](#), correspondiente al 6 de junio del 2023 en horas de la madrugada, ya que es en este periodo cuando se encuentra mayor incidencia de meteoros.

Además, podemos apreciar la distribución de velocidades radiales del meteoro respecto a la altura medida para un instante determinado, como se muestra en el rectángulo negro de la [Figura 10](#).

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP - ROJ se presentan en la [Figura 11](#). Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron muy por encima de las demás debido a que ambas se encuentran en el ecuador magnético y el Electrochorro Ecuatorial (EEJ) contribuye al incremento en sus mediciones.

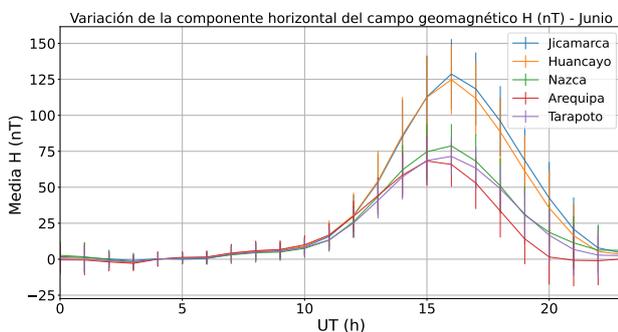


Figura 11. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de junio del 2023.

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 junio de H por cada estación: Jicamarca, 129 nT; Huancayo, 125 nT; Arequipa, 68 nT; Nazca, 79 nT y Tarapoto, 71 nT.

5. Conclusiones

- Presenciamos 2 tormentas geomagnéticas de moderada y baja intensidad (16 y 24 - 25 de junio), aunque ambas tuvieron orígenes diferentes (CIR y

CME). Se espera poder detectar una tormenta de origen CIR 27 días después de la detectada el 16 de junio.

- Se realizaron mediciones con el radar principal que nos permitieron discernir entre los ecos provenientes de la cabeza de un meteoro y los ecos correspondientes a la estela de ionización que deja a su paso.
- Los promedios en alturas (300 km - 400 km) de las derivas verticales de plasma del presente mes muestran una buena concordancia con las predicciones del modelo de Scherliess - Fejer.

6. Referencias

- [1] G. Pröls, "Physics of the earth's space environment," Springer, vol. 1st ed, pp. 342-244, 2004.
- [2] 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)
- [3] "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)
- [4] "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)
- [5] 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.
- [6] J. Smith, F. Rodrigues, B. Fejer, and M. Milla, "Coherent and incoherent scatter radar study of the climatology and day-to-day variability of mean f region vertical drifts and equatorial spread f," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, no. 2, pp. 1466-1482, 2016.
- [7] 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.
- [8] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca", Jul 2021, Accessed: Jul. 3, 2023. [Online]. Available: [1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf](https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf)

[9] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca", " Jul 2021, Accessed on: Jul. 3, 2023. [Online]. Available: 1 <https://www.igp.gob.pe/>

[observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/202107.pdf](https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/202107.pdf)

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