

Validation of the Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) model in the province of Huancayo

Julio Angeles Suazo, Doctor^{1*}; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Carmencita Lavado Meza, Doctor¹; Nataly Angeles Suazo, Maestra³; Leonel de la Cruz Cerrón, Maestro⁴; Jairo Edson Gutiérrez-Collao¹, Maestro; Pabel Meza Mitma, Bachiller¹

¹Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Tayacaja, Perú

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú

⁴Universidad Continental. Huancayo, Perú

Abstract— *The Andean region of Peru is located in a tropical zone with low tropospheric ozone concentration, making it prone to greater exposure to ultraviolet B (UV-B) radiation, which causes damage to the skin, eyes, and immune systems. Despite awareness of the situation in the Andes, the constant increase in urbanization and the number of vehicles on the road, as well as manufacturing industries, may further deplete the ozone layer in this region. Therefore, the research work consisted of estimating the variability of the total ozone column in February 2010 in the Mantaro Valley using the tropospheric Ultraviolet and visible (TUV) model, and for its validation, ground measurements were taken, synchronizing it with the Ground-Based Ultraviolet (UV) GUV-511 Biospherical Inc. spectral radiometer, which provides measurements at 305, 320, 340, and 380 nm and the ultraviolet (UV) index. Spearman's correlation coefficient was determined for the statistical evaluation and validation of the TUV model. A value of 0.86 ($p > 0.05$) was obtained for the UV index for Huancayo. In addition, a maximum clear sky radiance was given at 305 nm, 320 nm, 340 nm, and 380 nm of 0.12, 0.4, 0.64, and 0.83 W/m²nm, respectively, and a UV index of 12. It is concluded that the use of the TUV model allows the annual climate of the RUV in the ECAMP to be predicted.*

Keywords.— *Ultraviolet radiation, Huancayo, Ultraviolet Index, Ozone.*

Validación del modelo Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) en la provincia de Huancayo

Julio Angeles Suazo, Doctor^{1*}; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Carmencita Lavado Meza, Doctor¹; Nataly Angeles Suazo, Maestra³; Leonel de la Cruz Cerrón, Maestro⁴; Jairo Edson Gutiérrez-Collao¹, Maestro; Pabel Meza Mitma, Bachiller¹

¹Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo. Tayacaja, Perú

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú

⁴Universidad Continental. Huancayo, Perú

Resumen— La zona andina del Perú se encuentra en zona tropical de baja concentración de ozono troposférico, haciéndolo propenso a un mayor impacto a la radiación ultravioleta de tipo B (UV-B) causando daños a la piel, ojos y sistemas inmunológicos. Pese al conocimiento de la situación andina en este tema, el constante aumento del urbanismo y parque automotor, así como industrias manufactureras pueden generar aún más el agotamiento de la capa de ozono de esta región. Por lo tanto, el trabajo de investigación consistió en estimar la variabilidad de la columna total de ozono en febrero del 2010 en el valle del Mantaro y se utilizó el modelo tropospheric Ultraviolet and visible (TUV), y para su validación se realizaron mediciones en tierra, sincronizándolo con el radiómetro espectral Ground-Based Ultraviolet (UV) GUV-511 Biospherical Inc., que brinda mediciones a 305, 320, 340 y 380 nm e índice ultravioleta (UV). Se determinó el coeficiente de correlación de Spearman para la evaluación y validación estadística para el modelo TUV. Donde se obtuvo un valor de 0.86 ($p > 0.05$), para el índice UV para Huancayo. Además, se dio una máxima radiancia cielo despejado a 305nm, 320nm, 340nm, 380nm de 0.12, 0.4, 0.64, 0.83 W/m²nm y un índice UV de 12. Se concluye que el uso del modelo TUV permite pronosticar la climatología anual de la RUV en la ECAMP.

Palabras clave.— Radiación Ultravioleta, Huancayo, Índice Ultravioleta, Ozono.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) se relaciona con la vida de la tierra, por su implicancia en el sistema energético terrestre, los procesos fotobiológicos y fotoquímicos en la atmósfera y superficie [1]. Existen tres tipos de UV, el tipo A (UV-A) comprendida de 320 nm a 400 nm, es la cercana a la radiación visible, menos energética, y es responsable del bronceado de piel, el tipo B (UV-B) que se extiende de los 280 - 320 nm y el tipo C (UV-C) que representa la banda más peligrosa para la vida y se extiende entre 100 hasta 280 nm, pero absorbida totalmente por la atmósfera de la tierra.

Entre las enfermedades que puede generar la UV son los problemas oculares, principalmente las cataratas en regiones de gran altitud [2], cáncer de piel [3] y la alteración del sistema inmunológico por una exposición prolongada, suprimiendo respuestas inmunitarias locales y sistémicas, reduciendo la eficacia de las vacunas [4], [5]. Por estas razones, se hace indispensable conocer la variabilidad de la UV en puntos

determinados para mejorar la información pública y reducir riesgos en la salud.

Normalmente, los niveles de UV son más altos alrededor del mediodía durante el verano en regiones tropicales y subtropicales [6], [7]. Al mismo tiempo, la rarefacción atmosférica provoca que en las zonas más elevadas sea mayor la UV por disminución en dispersión de gases y partículas; que, por cada 1000 m de altitud se aumenta aproximadamente de 10 % a 20 % de UV dependiendo de las condiciones [8], [9].

Además, los reportes científicos han indicado que no hay un incremento significativo de la intensidad de la RUV en la región tropical [10], [11], tampoco hay una disminución de la capa de ozono en dicha región [12], caso contrario ocurre en la región antártica, donde hay una tendencia en la recuperación de la capa de ozono [13]. Sin embargo, debido al cambio climático se ha producido un cambio en la composición atmosférica, principalmente en el ozono troposférico, y el impacto de la UV [14], [15], [16].

Producto de la alteración atmosférica, se proyectó variabilidades extremas de la UV, particularmente en regiones de gran altitud, por el cambio en la cobertura de nubes y la dinámica del ozono [17].

En ese contexto, el estudio de la variabilidad de la UV representa un campo de conocimiento importante, más aún en zonas de gran altitud [18]. Una de las herramientas más útiles para su medición ha sido la implementación del índice ultravioleta solar [19], [20] que reporta la intensidad de radiación ultravioleta (RUV) eritémica, que tiene efecto en la piel al producir el eritema, enrojecimiento de la piel. Una investigación en Sudamérica en el periodo de 1980-2009 reporta variaciones temporales y espaciales asociado a procesos dinámicos atmosféricos, transporte meridional y circulación atmosférica, sin embargo, el estudio presenta limitaciones acerca de la significancia estadística debido a la amplitud con la que se evaluó [21]. Por lo que es importante estudios posteriores más enfocados a una zona regional.

El Perú debido a su ubicación geográfica en la región tropical recibe intensa radiación solar y tiene una natural mínima protección de la capa de ozono y de forma especial la región andina. A razón de ello en zonas donde haya menor capa de ozono o un agotamiento en el ozono estratosférico implicaría un aumento de la radiación ultravioleta solar a nivel de

superficie [22], que conjuntamente con la influencia de otros contaminantes precursores del ozono troposférico, puede provocar cambios en la radiación solar que llegan a la superficie terrestre [23]. Además, la región central andina peruana, Junín, evidencia altos niveles UV, ya que se encuentra en una zona tropical de baja concentración de columna total de ozono, por lo que es necesario hacer evaluaciones periódicas [24].

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la variabilidad de la columna total de ozono en el mes de febrero del 2010 en el valle del Mantaro y la variabilidad de la radiación ultravioleta en las siguientes longitudes de onda: 305 nm, 310 nm, 320 nm, 340 nm y 380 nm, a través del Biospherical Ultraviolet and Visible (GUV) y el modelo Tropospheric Ultraviolet Visible (TUV). De esta manera, contribuyendo a la prevención de la exposición prolongada a la UV; y al entendimiento de los procesos atmosféricos en Huancayo.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Sitio y localización

Las mediciones se realizaron en la Universidad Alas Peruanas, ubicada en la región Andina del Perú, en la provincia de Huancayo, departamento de Junín a una latitud de $-12^{\circ} 03' 17.97''$ S, longitud de $-75^{\circ} 36' 61''$ W y a una altitud de 3240 m.s.n.m.

B. Procedimiento

Se instaló el espectroradiómetro de filtro multicanal GUV-511 de la fábrica Biospherical Instruments Inc. La teoría de operación consiste en que la luz solar entra al detector, es difuminada y filtrada para diferentes fotodiodos, en forma independiente, produciendo sus respectivas corrientes proporcionales registrado así la irradiancia en 305, 320, 340 y 380 nm (FWHM+10nm) y el PAR (región activa fotosintética. 400-700nm). Además, cuenta con un controlador de temperatura que lo mantiene a 40°C para reducir la dependencia de la temperatura. La recolección de la información se realizó mediante el software Daswin, el cual genera una base de datos en una computadora. Se registró valores por minuto las 24 horas del día para el año 2010 en el valle del Mantaro. Posteriormente se compararon los datos recolectados en el Daswin con el modelo TUV (Tropospheric Ultraviolet) para determinar y observar el grado de correlación que existe para las longitudes de onda de 305, 320, 340 y 380 nm e índice UV.

Cada uno de los 4 canales fue sincronizado para registrar promedios de la irradiancia, cada minuto, medidos en unidades de $\text{uW.cm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ (para convertir a $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ solo se divide entre 100). En el caso del radiómetro GUV-511, para la obtención del índice UV (I-UV) los valores de 305, 320 y 340 nm son multiplicados con sus respectivos valores de calibración para luego sumarlos y finalmente, obtener el valor del I-UV. El registro de mediciones con este instrumento se realiza desde setiembre del 2002 y es el único medidor espectral de radiación UV del Perú.

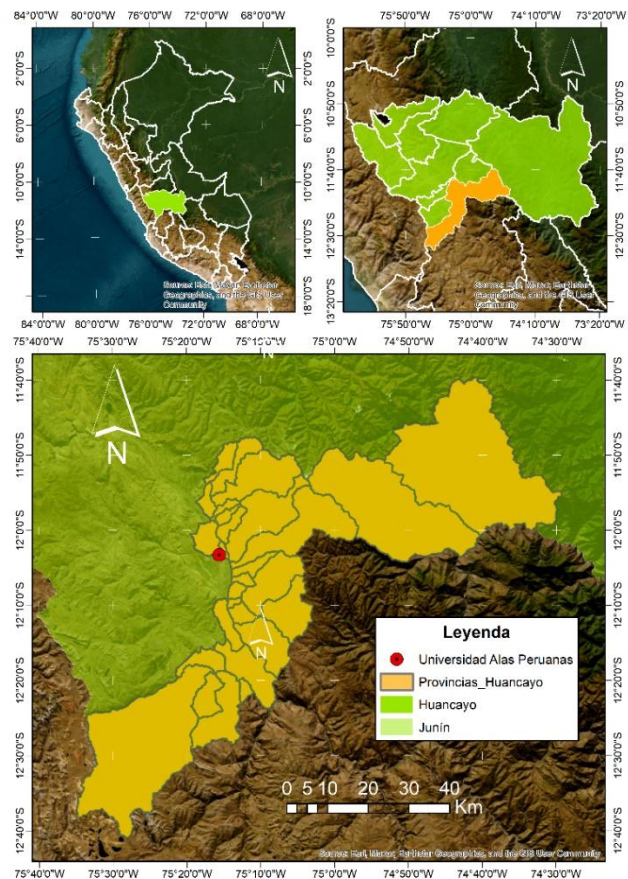


Fig. 1. Mapa de ubicación de la zona estudiada

C. Procesamiento de los datos

El modelo radiativo utilizado para la evaluación de la radiación UV fue estimado por el modelo Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) del National Center for Atmospheric Research (NCAR) versión 4.1^a [12]. Modelo usado sobre el rango de radiación de 121 a 750 nm, para calcular la irradiancia espectral, el flujo actínico, los coeficientes de fotodisociación, y la irradiancia efectiva biológicamente, y a partir de esta el índice UV.

El código está escrito en fortran 77 estándar y opera en un entorno UNIX. Este modelo fue adaptado a las condiciones de Huancayo, habiéndose cambiado valores característicos de la ubicación. Finalmente, para el análisis de datos se determinó el coeficiente de correlación de Spearman a un nivel de confianza de 95%.

La distribución temporal del ozono fue obtenida con el OMI con un promedio de 242.06 UD, con una desviación estándar de ± 13.12 UD en la región andina donde se utilizó para la validación del modelo TUV, asimismo se consideró la influencia de los aerosoles con otros contaminantes del aire [25]. Asimismo, El índice UV se reporta como un valor entero de 0 a 20 e indica niveles de RUV eritémica sobre la superficie terrestre y permite a las personas calcular su tiempo máximo de exposición al sol sin riesgo a sufrir un eritema.

III. RESULTADOS

Variación de la columna total de ozono en huancayo

Los datos de la columna total de ozono se obtuvo mediante la suma del ozono troposférico y estratosférico colectados mediante el sensor OMI del satélite AURA Huancayo, que va tener un especial enfoque para entender de mejor manera las variaciones de ozono, como se muestra en la Fig. 1.

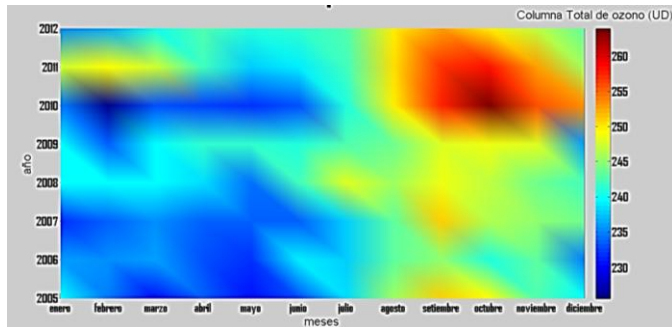


Fig. 1. Variación de la Columna total de ozono en Huancayo

Así, es posible observar que los mayores valores de la concentración de ozono que se da en Huancayo, donde se observa un máximo y mínimo de 260 y 230 UD en los meses de setiembre y mayo respectivamente.

Variación horaria de la radiación UV y validación del modelo TUV en la provincia de Huancayo

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento horario de la radiación UV para el 24 de marzo del 2010 se dio una máxima radiancia en la provincia de Huancayo a 305 nm, 320 nm, 340nm, 380nm e índice UV a cielo despejado de 0.12, 0.4, 0.64, 0.83 $\text{W/m}^2\text{nm}$ y 12 respectivamente mediante el radiómetro GUUV, y comparando con el modelo TUV durante las 24 horas. Es posible ver la adecuada réplica de la variación horaria de la RUV, pero además la diferencia debido a la presencia de nubes. Luego utilizando el software Matlab para realizar la prueba estadística de correlación de Spearman de 0.86 ($p > 0.05$) para el índice UV.

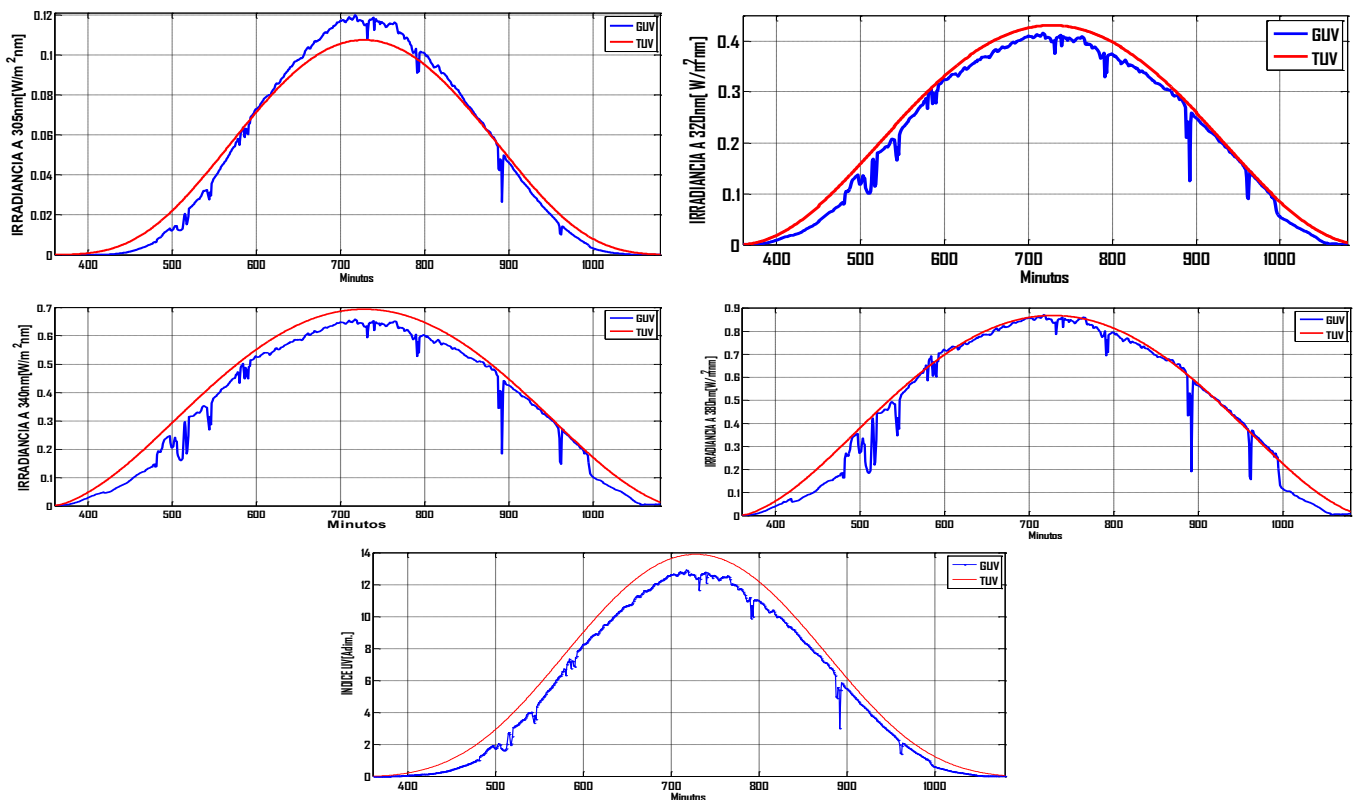


Fig. 2: Variación de la radiación UV a 305, 320, 340, 380 nm e índice UV en la provincia de Huancayo

Variación mensual de la radiación UV en Huancayo

En la Fig. 3, se muestran los valores promedio de la radiación UV espectral (305, 320, 340 y 380 nm) en Huancayo para el año 2010 del mes de febrero. Se observa que tienen un

máximo valor de 0.06, 0.5, 0.8, 1 $\text{W/m}^2\text{nm}$ a 305, 320, 340 y 380nm respectivamente e índice UV de 18, debido al menor ángulo cenit (SZA) que se presenta en estas fechas ya que corresponden a la estación de verano y las bajas concentraciones de ozono estratosférico.

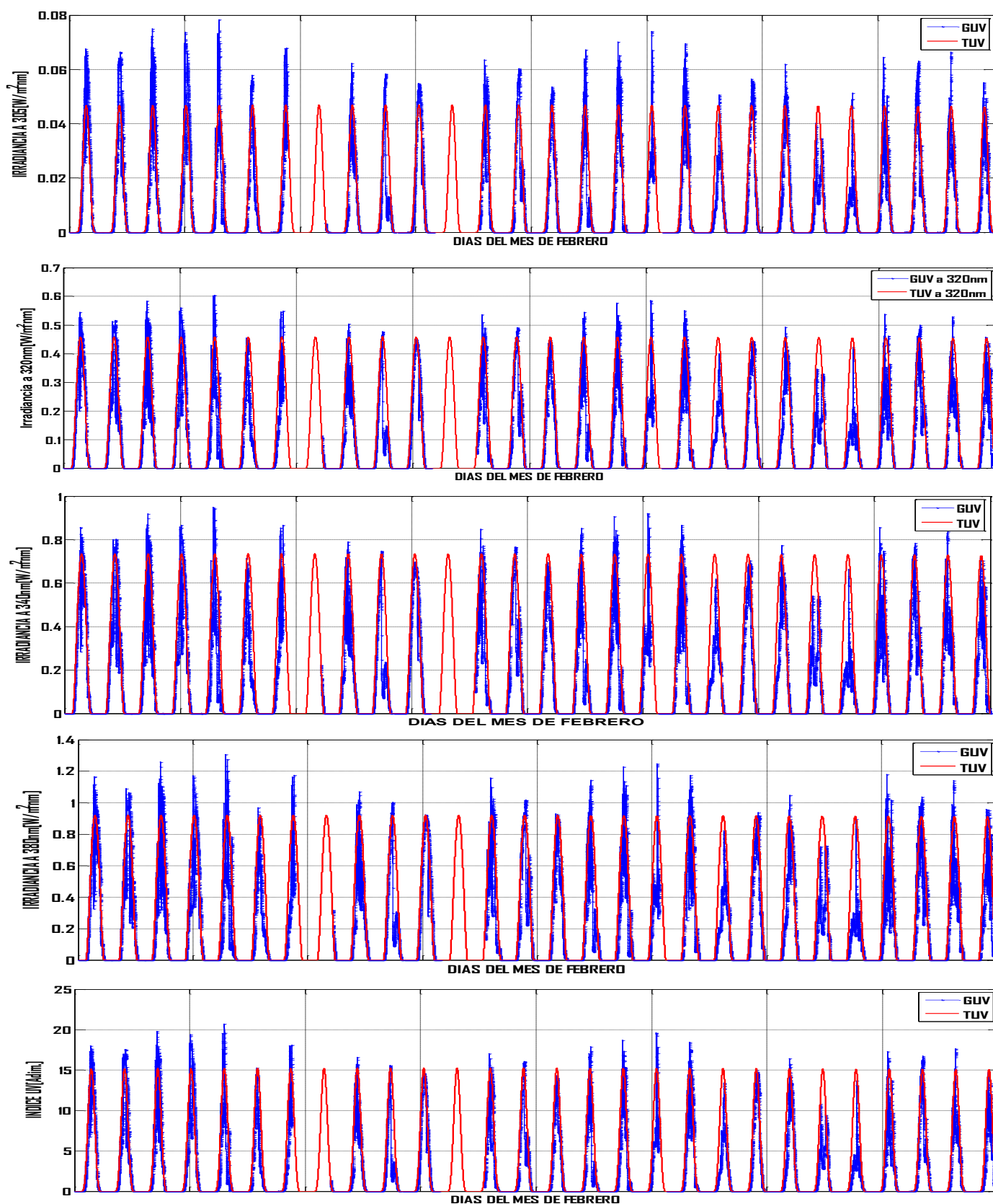


Fig. 3: Variación de la Radiación UV mensualmente en Huancayo

IV. DISCUSIÓN

Los modelos no pueden superar la precisión de los datos de entrada, debido a la incertidumbre que genera los cambios espectrales, composición de la superficie y atmosfera, y aproximaciones por eficiencia computacional en la ecuación de transferencia radiativa. La experiencia de los últimos años ha mostrado que si el estado del cielo está extremadamente bien caracterizado (libre de nubes, libre de contaminantes, con medidas auxiliares del perfil de ozono, de la reflectividad superficial, etc.) se puede realizar modelos aceptables [26]. Sin embargo, la presencia de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros componentes de la atmósfera contribuyen a la formación fotoquímica del ozono troposférico alterando los modelos, pero que representa una oportunidad de integrar esta variable para su posterior análisis [27]. A pesar de que el modelo tiene un 0.86 de correlación, existe un 14 % de variabilidad en la que el modelo no coincidió con el sensor. Esto puede deberse a la formación de aerosoles debido a la quema biomasa, principalmente aerosoles orgánicos y carbono negro, generando cambios en la dispersión y profundidad óptica de los aerosoles (AOD, por sus siglas en ingles), alterando la transmisión de radiación UV y el ozono troposférico en Huancayo [28], [29] antes de que llegue al sensor. disminuyendo la irradiancia UV medida respecto al modelo TUV, el cual considera condiciones atmosféricas homogéneas.

Por ejemplo, en un estudio se estimó que el espesor óptico de aerosol (EOA) reduce la irradiancia UV-B alrededor de 5 a 35% [30]. Además, los aerosoles absorben radiación UV-B y afecta de esta manera la cantidad recibida de radiación UV por los humanos y la biosfera [31]. En investigaciones similares la correlación con el modelo TUV para la misma ubicación muestra un coeficiente de correlación de 0.88 [32] y 0.98 [24] cuando se realizó la comparación con las mediciones en tierra.

Por otro lado, tras un análisis del 2005-2020 acerca de la columna total de ozono, se halló un promedio mensual de 243.1 UD sobre Huancayo [33], estando dentro del rango encontrado en este estudio, lo que significa que hay variabilidad que no representan anomalías. Sin embargo, la presencia de aerosoles, nubosidad y transporte atmosférico siguen modulando la radiación UV en esta zona [28].

La Fig. 4 nos muestra el pronóstico de la climatología anual de la RUV en Huancayo que fue obtenida utilizando el modelo TUV obteniéndose un índice UV máximo de 15 en las estaciones de verano y primavera a las 12 pm y comparando con los lineamientos de la Organización mundial de salud (OMS) y otras instituciones de la temática de las radiaciones [20], donde indica que el índice UV en Huancayo es de categoría extrema según la tabla 1. Además, en la investigación de [34], encontraron que una de las ciudades con mayor intensidad de radiación ultravioleta (UVI) es Marcapomacocha con 23.5, perteneciente al departamento de Junín, donde existen menor protección de la capa de ozono estratosférico. Mientras que [35], mostraron que la misma región presenta valores cercanos a 20 de UVI, con una gradiente vertical cercana a 2 de índice de UV por cada 1 km de altitud.

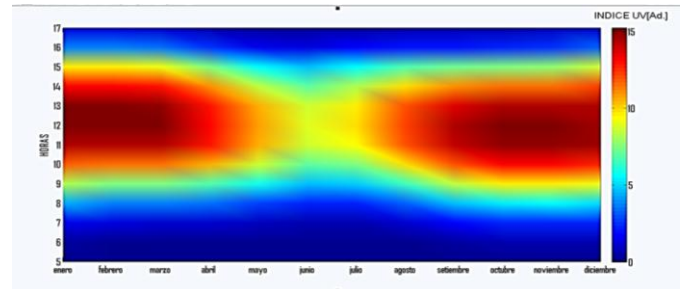


Fig. 4. Climatología del índice UV para Huancayo

De acuerdo a la tabla 1, el índice UV es medida estándar internacional que indica la intensidad de la radiación ultravioleta (UV) en la superficie terrestre y su impacto en la salud humana, ampliamente usada para informar a la sociedad sobre los riesgos a la exposición al sol [36], por lo que valores superiores a 8-11 representa niveles riesgosos. Se demostró que por cada 1000 metros de altura puede aumentar el riesgo de sufrir un índice UV > 11 entre un 5.6 % y 11.6 % [37]. Además, una exposición prolongada al aire libre suele generar quemaduras en la piel, generar fotoenvejecimiento al dañar el colágeno y la elastina e inducir cataratas [38].

TABLA 1.
CATEGORÍAS DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN UV Y SUS CODIGÓS DE COLOR INTERNACIONAL

Índice UV	Categoría	Color
< 4	Bajo	Verde PMS 375
4 – 7	Moderado	Amarillo PMS 102
8 – 11	Alto	Naranja PMS 151
12 – 15	Muy alto	Rojo PMS 032
> 15	Extrema	Purpura PMS 265

V. CONCLUSIÓN

Las mediciones en Huancayo sobre la radiación UV para el 24 de marzo del 2010 tuvo una máxima radiancia a 305 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e índice UV a cielo despejado de 0.12, 0.4, 0.64, 0.83 $\text{W/m}^2\text{nm}$, respectivamente, mediante el radiómetro GUV, y comparado con el modelo TUV durante las 24 horas. Se obtuvo una correlación de Spearman de 0.86 ($p > 0.05$) para el índice UV, por lo que es aceptable usar el modelo TUV para modelar la RUV en Huancayo y la ECAMP para estudiar el Índice UV, considerando que no se ha modelado los efectos de las nubes.

Los altos valores de radiación UV para cada longitud de onda en Huancayo se debe al menor ángulo cenit (SZA) que se presenta en estas fechas ya que corresponden a las estaciones de verano y las bajas concentraciones de ozono estratosférico.

Estos conjuntos de datos obtenidos y validados con el modelo TUV permiten pronosticar la climatología anual de la RUV en la ECAMP como en Huancayo y varias zonas del mundo, asimismo determinar la influencia de nubosidad en el modelo TUV para cada región del mundo.

REFERENCIAS

- [1] L. Felipe *et al.*, “Resultâncias fisiobiológicas da radiação ultravioleta e suas funções na carcinogênese de pele,” *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 833–842, Jan. 2024, doi: 10.36557/2674-8169.2024v6n1p833-842.
- [2] N. Hatsusaka *et al.*, “Association among pterygium, cataracts, and cumulative ocular ultraviolet exposure: A cross-sectional study in Han people in China and Taiwan,” *PLoS One*, vol. 16, no. 6, p. e0253093, Jun. 2021, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0253093.
- [3] V. Patra *et al.*, “Ultraviolet exposure regulates skin metabolome based on the microbiome,” *Scientific Reports* 2023 13:1, vol. 13, no. 1, pp. 7207–, May 2023, doi: 10.1038/s41598-023-34073-3.
- [4] United Nations Environment Programme, *Environmental effects of ozone depletion: 1998 Assessment*. 1998. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/Environmental-Effects-Assess98.pdf>
- [5] P. H. Hart and M. Norval, “More Than Effects in Skin: Ultraviolet Radiation-Induced Changes in Immune Cells in Human Blood,” *Front. Immunol.*, vol. 12, p. 694086, Jun. 2021, doi: 10.3389/FIMMU.2021.694086/TEXT.
- [6] A. A. Silva, A. L. C. Yamamoto, and M. P. Corrêa, “Daily Maximum Erythral Dose Rates in the Tropics,” *Photochem. Photobiol.*, vol. 95, no. 3, pp. 886–894, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1111/php.13054>.
- [7] A. L. C. Yamamoto, M. de P. Corrêa, R. R. Torres, F. B. Martins, and S. Godin-Beekmann, “Total ozone content, total cloud cover, and aerosol optical depth in CMIP6: simulations performance and projected changes,” *Theoretical and Applied Climatology* 2024 155:3, vol. 155, no. 3, pp. 2453–2471, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04821-6>.
- [8] M. D. P. Corrêa, “Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America,” *An. Bras. Dermatol.*, vol. 90, no. 3, pp. 297–313, Jul. 2015, doi: 10.1590/ABD1806-4841.20154089.
- [9] A. W. Schmalwieser, G. R. Casale, A. Colosimo, S. S. Schmalwieser, and A. M. Siani, “Review on Occupational Personal Solar UV Exposure Measurements,” *Atmosphere* 2021, Vol. 12, Page 142, vol. 12, no. 2, p. 142, Jan. 2021, doi: 10.3390/ATMOS12020142.
- [10] Ayité-Lô Nohende Ajavon, Paul A. Newman, John A. Pyle, and A.R. Ravishankara, “Stratospheric ozone and surface ultraviolet radiation,” in *NOAA CSL: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*, vol. Report 42. Vol 2, Christine A. Ennis, Ed., World Meteorological Organization, 2011, ch. 2, pp. 1–516. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2010/figures.html>
- [11] Herman J. R. and McKenzie R. L., “Ultraviolet radiation at the earth’s surface,” in *Scientific assessment of ozone depletion: 1998*, vol. Report 44, World Meteorological Organization, 1998, ch. 9, pp. 1–228. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/761754>
- [12] M. Chipperfield and Randel WJ, “Global ozone: past and future,” in *Scientific assessment of ozone depletion: 2002*, vol. 47, World Meteorological Organization, 2003, ch. 2, pp. 1–485.
- [13] M. Salby, E. Titova, and L. Deschamps, “Rebound of Antarctic ozone,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, no. 9, p. 9702, May 2011, doi: 10.1029/2011GL047266.
- [14] P. W. Barnes *et al.*, “Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future,” *Nature Sustainability* 2019 2:7, vol. 2, no. 7, pp. 569–579, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41893-019-0314-2.
- [15] M. P. Corrêa, A. L. C. Yamamoto, G. R. Moraes, S. Godin-Beekmann, and E. Mahé, “Changes in the total ozone content over the period 2006 to 2100 and the effects on the erythral and vitamin D effective UV doses for South America and Antarctica,” *Photochemical & Photobiological Sciences* 2019 18:12, vol. 18, no. 12, pp. 2931–2941, Oct. 2020, doi: 10.1039/C9PP00276F.
- [16] A. L. C. Yamamoto, M. de P. Corrêa, R. R. Torres, F. B. Martins, and S. Godin-Beekmann, “Projected changes in ultraviolet index and UV doses over the twenty-first century: impacts of ozone and aerosols from CMIP6,” *Photochemical & Photobiological Sciences* 2024 23:7, vol. 23, no. 7, pp. 1279–1294, May 2024, doi: 10.1007/S43630-024-00594-7.
- [17] L. A. Arias, F. Berli, A. Fontana, R. Bottini, and P. Piccoli, “Climate Change Effects on Grapevine Physiology and Biochemistry: Benefits and Challenges of High Altitude as an Adaptation Strategy,” *Front. Plant Sci.*, vol. 13, p. 835425, May 2022, doi: 10.3389/FPLS.2022.835425/FULL.
- [18] L. Vuilleumier, T. Harris, A. Nenes, C. Backes, and D. Vernez, “Developing a UV climatology for public health purposes using satellite data,” *Environ. Int.*, vol. 146, p. 106177, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENVINT.2020.106177.
- [19] W. R. Burrows, M. Vallée, D. I. Wardle, J. B. Kerr, L. J. Wilson, and D. W. Tarasick, “The Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation,” *Meteorological Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 247–265, Sep. 1994, doi: 10.1002/MET.5060010307.

- [20] Who, "Global Solar UV Index A Practical Guide," World Health Organization. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9241590076>
- [21] R. Toro A, C. Araya, F. Labra O, L. Morales, R. G. E. Morales, and M. A. Leiva G, "Trend and recovery of the total ozone column in South America and Antarctica," *Climate Dynamics* 2017 49:11, vol. 49, no. 11, pp. 3735–3752, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3540-1>.
- [22] B. C. Thomas, P. J. Neale, and B. R. Snyder, "Solar Irradiance Changes and Photobiological Effects at Earth's Surface Following Astrophysical Ionizing Radiation Events," <https://home.liebertpub.com/ast>, vol. 15, no. 3, pp. 207–220, Mar. 2015, doi: 10.1089/AST.2014.1224.
- [23] D. Ghosh and U. Sarkar, "Analysis of the photochemical production of ozone using Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) Radiation Model in an Asian megacity," *Air Qual. Atmos. Health*, vol. 9, no. 4, pp. 367–377, May 2016, doi: 10.1007/S11869-015-0346-3/FIGURES/7.
- [24] L. F. Suárez Salas, J. L. Flores Rojas, A. J. Pereira Filho, and H. A. Karam, "Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0°S)," *Photochemical & Photobiological Sciences* 2017 16:6, vol. 16, no. 6, pp. 954–971, Oct. 2020, doi: 10.1039/C6PP00161K.
- [25] J. Bachwenkizi, S. Shabani, I. P. Nyarubeli, and S. Mamuya, "Chemical Concentrations, Source Emission, Potential Toxicity, and Health Risk of Ambient Fine Particulate Matter and Its Constituents: A Recent Literature Review," *Curr. Pollut. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, Dec. 2025, doi: 10.1007/S40726-024-00332-8/METRICS.
- [26] M. del R. Torres Deluigi, L. R. Saravia Mathon, and R. Piacentini, "Modelización de la radiación solar ultravioleta: aplicación y testeo del TUV," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, 2001, Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79909>
- [27] A. Pakkattil and S. Ghude, "Tropospheric ozone precursors over the Indian region: Insights into the shift toward a highly NO_x-limited regime," *Atmos. Environ.*, vol. 353, p. 121233, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2025.121233.
- [28] C. Victoria-Barros and R. Estevan Arredondo, "Characterization of the Optical Properties of Biomass-Burning Aerosols in Two High Andean Cities, Huancayo and La Paz, and Their Effect on Radiative Forcing," *Atmosphere* 2025, Vol. 16, Page 1240, vol. 16, no. 11, p. 1240, Oct. 2025, doi: 10.3390/ATMOS16111240.
- [29] A. Chatzopoulou, K. Tourpali, A. F. Bais, and P. Braesicke, "Effects of different aerosol types on surface UV radiation in the 21st century," *Atmos. Environ.*, vol. 362, p. 121595, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2025.121595.
- [30] A. Kylling, A. F. Bais, M. Blumthaler, J. Schreder, C. S. Zerefos, and E. Kosmidis, "Effect of aerosols on solar UV irradiances during the Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation campaign," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 103, no. D20, pp. 26051–26060, Oct. 1998, doi: 10.1029/98JD02350.
- [31] B. N. Wenny *et al.*, "A study of regional aerosol radiative properties and effects on ultraviolet-B radiation," *JGR*, vol. 103, no. D14, pp. 17,083–17,097, Jul. 1998, doi: 10.1029/98JD01481.
- [32] L. Suárez, A. Contreras, and H. Trigo, "Modelamiento y pronóstico del índice ultravioleta solar en Huancayo," *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, vol. 02, no. 02, pp. 138–147, Dec. 2012, doi: 10.18259/ACS.2012016.
- [33] J. Miguel *et al.*, "Variación espacial de la columna total de Ozono en Huancayo, Santiago de Chile y Antártida durante 2005-2020," *Revista de Investigación Científica Tayacaja*, vol. 5, no. 2, pp. 33–37, Dec. 2022, doi: 10.46908/TAYACAJA.V5I2.200.
- [34] A. L. C. Yamamoto, M. de P. Corrêa, and O. R. S. Ccoyllo, "Validation and Analysis of UV Radiation Time Series Collected in Different Peruvian Sites," *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 33, no. 2, pp. 298–305, Apr. 2018, doi: 10.1590/0102-7786332011.
- [35] R. Ángeles Vásquez, A. G. Corzo, J. Á. Suazo, and Á. Vásquez, "Gradiente altitudinal de la radiación ultravioleta en la región Junín," *Prospectiva Universitaria en Ingeniería y Tecnología*, vol. 18, no. 1, pp. 47–51, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2021.18.1415>.
- [36] E. Luccini, F. Orte, J. Lell, F. Nollas, G. Carbajal, and E. Wolfram, "The UV Index color palette revisited," *J. Photochem. Photobiol.*, vol. 15, p. 100180, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JPAP.2023.100180.
- [37] M. de P. Corrêa *et al.*, "Comparing the ultraviolet index at sea level and altitude in six Chilean locations," *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 18, no. 3, pp. 1714–1723, Apr. 2025, doi: 10.26848/rbgef.v18.3.p1714-1723.
- [38] S. D. Galawe, K. Lebelo, and P. C. Rathebe, "Cross-sectional study protocol to assess ultraviolet radiation exposure among military outdoor workers in Lohatla, Northern Cape Province of South Africa," *BMJ Open*, vol. 15, no. 1, p. e083811, Jan. 2025, doi: 10.1136/BMJOPEN-2023-083811.