

Analysis of the Ultraviolet Index in the city of Puno using an Empirical Model

Matias Huillca Arbieto¹,,
Ciro William Taipe Huaman²,,
Eva Genoveva Mendoza Mamani³,

^{1,3}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, mhuillca@unap.edu.pe, emendoza@unap.edu.pe

²Universidad Nacional de Juliaca, Perú, c.taipe@unaj.edu.pe

Abstract– The present study aims to analyze the ultraviolet index in the city of Puno by applying an empirical model, in order to evaluate its variability and behavior over time. To do this, global solar radiation and ultraviolet index data corresponding to the period 2016-2018 were examined. The study was carried out at the Universidad Nacional del Altiplano - Puno, located in the city of Puno. For the analysis, measurements obtained from the DAVIS Vantage PRO 2.0 Plus meteorological station were used, considering the variables of global solar radiation and ultraviolet index. The statistical processing included the calculation of the mean absolute error, as well as the coefficients of determination and correlation between the measured values and those estimated by the model. The results indicate that the proposed model for estimating the ultraviolet index in clear skies presents a high degree of fit with the observed data, reaching an approximate correlation of 0.988. Furthermore, the model developed for cloudy conditions shows a significant correspondence with the measurements, with a correlation of 0.984 during the study period. These findings support the reliability of the proposed models for estimating the ultraviolet index under different atmospheric conditions.

Keywords-- weather station, ultraviolet index, empirical model, Puno solar radiation.

Análisis del Índice Ultravioleta en la ciudad Puno mediante un Modelo Empírico

Matias Huilca Arbieto¹,,
Ciro William Taipe Huaman²,,
Eva Genoveva Mendoza Mamani³,

^{1,3}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, mhuilca@unap.edu.pe, emendoza@unap.edu.pe

²Universidad Nacional de Juliaca, Perú, c.taipe@unaj.edu.pe

Resumen— El presente estudio tiene como objetivo analizar el índice ultravioleta en la ciudad de Puno mediante la aplicación de un modelo empírico, con el propósito de evaluar su variabilidad y comportamiento a lo largo del tiempo. Para ello, se examinaron datos de radiación solar global e índice ultravioleta correspondientes al periodo 2016-2018. El estudio se llevó a cabo en la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, ubicada en la ciudad de Puno. Para el análisis, se utilizaron las mediciones obtenidas de la estación meteorológica DAVIS Vantage PRO 2.0 Plus, considerando las variables de radiación solar global e índice ultravioleta. El procesamiento estadístico incluyó el cálculo del error medio absoluto, así como los coeficientes de determinación y correlación entre los valores medidos y los estimados por el modelo. Los resultados indican que el modelo propuesto para la estimación del índice ultravioleta en cielos despejados presenta un alto grado de ajuste con los datos observados, alcanzando una correlación aproximada de 0.988. Asimismo, el modelo desarrollado para condiciones de nubosidad muestra una correspondencia significativa con las mediciones, con una correlación de 0.984 durante el periodo de estudio. Estos hallazgos respaldan la fiabilidad de los modelos propuestos para la estimación del índice ultravioleta en distintas condiciones atmosféricas.

Palabras clave— Estación meteorológica, Índice ultravioleta, modelo empírico, Puno radiación solar.

I. INTRODUCCIÓN

La irradiación solar ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra interactúa con la atmosfera mediante el proceso de absorción y dispersión. La irradiación en el rango de 100- 390 nm del espectro solar que llega a la atmosfera extraterrestre representa el 8% [1] y es ampliamente estudiada debido a que induce en diversos procesos físicos y biológicos [2]–[4]. Por otro lado, la irradiación el Índice de irradiación Ultravioleta (IUV) se divide en tres bandas: UV-C (100–290 nm), UV-B (290–315 nm) (Vanicek 2000) y UV-A (315–390 nm), siendo UV-B la más energética que llega a la superficie inferior de la tierra [5]. Los principales factores involucrados en la modulación de la radiación UV son la declinación solar, la nubosidad [6], la cantidad de ozono estratosférico y los aerosoles que atenúan el IUV [7].

Actualmente hay estudios que muestran los efectos de la radiación ultravioleta sobre la vida acuática [8], en plantas [9], [10], en la vegetación [11], [12], en los animales [13], [14], los ecosistemas terrestres y marinos [15], en la conservación y durabilidad de materiales como el plásticos y la pintura [16]; [17]; [18]; [19]. La irradiación UV también tiene la capacidad de causar daño directo e inmediato a la salud de las personas,

como el cáncer de piel y las cataratas [20]; [1]. Pero no toda la irradiación es perjudicial, por ejemplo [21] estudiaron la relación de la irradiación UV con la vitamina D.

El índice ultravioleta (UVI) es un parámetro esencial para evaluar la exposición a la radiación solar y su impacto en la salud humana. Su estimación precisa es crucial para desarrollar estrategias de prevención y mitigación frente a los efectos adversos de la radiación UV. Diversos estudios han validado métodos de estimación del UVI en distintas regiones del mundo, comparando mediciones satelitales y terrestres para mejorar la precisión de los modelos utilizados.

El estudio de la radiación ultravioleta y su impacto en la salud humana ha sido ampliamente abordado en la literatura científica, destacándose diversas investigaciones que han validado y analizado los niveles de radiación UV en distintas regiones del mundo. Bilbao y de Migué (2020) analizaron datos de irradiancia UVB y UVI en Valladolid, España, entre 2013 y 2019, encontrando que en días de verano los valores de UVI y la dosis acumulada pueden alcanzar niveles elevados, con más del 45% de la dosis anual concentrada en esta estación, estableciendo además una correlación entre la máxima UVI diaria y la dosis acumulada anual, relevante para estrategias de protección solar [22]. En este contexto, Mohanad y otros (2023) desarrollaron un modelo basado en inteligencia artificial para predecir el índice UVI, integrando una red neuronal convolucional con una red de memoria de largo plazo (CLSTM), lo que mejoró la precisión de las estimaciones en beneficio del público y organismos gubernamentales [23]. De manera complementaria, Adnin (2022) diseñó un monitor portátil con un nanosensor de ZnO para medir la exposición diaria a la radiación solar, alertando a los usuarios mediante una aplicación móvil y permitiendo el almacenamiento de datos para registros médicos [24]. En el ámbito latinoamericano, Mimbela (2016) estudió la variabilidad estacional de la radiación UV en ciudades de la región Piura, Perú, empleando la escala del índice UV y concluyendo que la irradiación en la zona oscila entre niveles altos y extremos durante todo el año, resaltando la necesidad de estrategias de mitigación [25], [26]. Paralelamente, la validación de datos satelitales ha sido clave en la mejora de modelos empíricos, como lo demuestran Tanskanen y otros (2023), quienes verificaron las estimaciones diarias del Ozone Monitoring Instrument (OMI) en 17 estaciones y 18 instrumentos ubicados en Europa, América del Norte, Nueva Zelanda y el sur de Argentina [27]. De manera similar, Bucharad y otros (2023) validaron los valores de la columna de ozono total y la radiación UV en estaciones de

Francia e Italia, mientras que Antón y otros (2023) realizaron un estudio exhaustivo en Arenosillo, España, donde se evidenció que la cobertura nubosa, la carga de aerosoles y el ángulo cenital solar influyen en la variabilidad del índice UV [28], [29].

Los datos estimados del IUV son útiles para desarrollar el comportamiento del clima y establecer la distribución geográfica y estacional en muchas áreas, por ejemplo, [7] tomaron datos en el área mediterránea para posteriormente estudiar los efectos de diferentes factores. Muchos autores en España analizaron la irradiación solar ultravioleta (UVER) en diferentes regiones del país: [30], [31], etc. En los estudios del UVER en Eslovaquia, [32] se propusieron los mapas de Isolina, mientras que [33] estudio la influencia de las actividades naturales y antropogénicas en la irradiación UV sobre un área tropical en la India.

La investigación tiene por objetivo analizar el índice ultravioleta en la ciudad de Puno mediante la aplicación de un modelo empírico, con el fin de evaluar su variabilidad y comportamiento en el tiempo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación geográfica

La investigación se realizó en la Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas, ubicado en la ciudad de Puno figura 1, con Latitud: 15. 83° S, Longitud: 70. 03° O y altitud 3825 m.s.n.m.



Fig. 1 Ubicación de la ciudad de Puno.
Fuente: Google Earth.

B. Modelo teórico

El espectro de acción de esta respuesta biológica, fue definido por [34] basado en el daño que provoca la radiación solar sobre la piel de los humanos. Si la radiación UV espectral recibida en superficie se multiplica con el espectro de acción y se integra desde 0.280 a 400 nm, se obtiene la radiación solar UV eritemática [35].

El índice ultravioleta se define mediante el espectro de acción eritemática, que describe el impacto de la radiación ultravioleta en la piel humana, según la formulación establecida por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

$$IUV = k_{er} \int_{0.28}^{0.40} I_{\lambda} \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Donde k_{er} es una constante igual a $40m^2/W$ y $\varepsilon(\lambda)$ es coeficiente de acción eritemática cuyo valores vienen dados por la ecuación (2) propuestos por Madronich y Flocke [36].

$$\varepsilon(\lambda) = \begin{cases} 1 & , \lambda \leq 0.298\mu m \\ 10^{0.094(298-1000/\lambda)} & , 0.298\mu m < \lambda \leq 0.328\mu m \\ 10^{0.015(139-1000/\lambda)} & , 0.328\mu m < \lambda \leq 0.400\mu m \end{cases} \quad (2)$$

La irradiancia ultravioleta global espectral en una superficie horizontal I_{λ} se calcula por medio de la ecuación (3).

$$I_{\lambda} = \left(\frac{[E_0 T_{r\lambda} T_{a\lambda} + [0.5(1-T_{r\lambda})T_{a\lambda}] + [F_c \omega_0 (1-T_{a\lambda})T_{r\lambda}]] T_{0\lambda} I_{0\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}} \right) \cos Z \quad (3)$$

Donde E_0 factor de corrección tierra-sol; $T_{i,\lambda}$ son las tramitancias; $\rho_{g\lambda}$ es el albedo del lugar; $\rho_{a\lambda}$ es el albedo de las nubes; $I_{0\lambda}$ es la irradiancia solar ultravioleta extraterrestre; Z es el ángulo cenital.

C. Modelo empírico

Mientras que el modelo empírico para cielos parcialmente nublados [37] es el siguiente:

$$IUV_{med} = a(\cos Z)^b \left(\frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[c+d \cos Z]} IUV_{s-n} \quad (4)$$

Donde los parámetros a, b, c y d , se obtienen a partir del ajuste de datos; Rad_{med} es la irradiación solar global medida; Rad_{s-n} ; IUV_{s-n} es la irradiación del IUV sin presencia de nubes, calculada por el programa SMARTS [38].

D. Datos de índice UV y Rad en la ciudad de Puno

Los datos del IUV, Rad comprenden el periodo 2016 hasta 2018, proporcionados por la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 Plus figura 2. Tiene una resolución de $1 W/m^2$ para la Rad y de 0.1 para el IUV, siendo su rango de 0 a 16 para el IUV. La estación meteorológica está ubicada en una zona despejada de sombras y obstáculos, en el pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del

Altiplano - Puno (UNAP), con coordenadas de latitud -15,4890, longitud -70,1515 y a una altitud de 3,825 m.s.n.m.



Fig. 2 Ubicación de la estación meteorológica.
Fuente: Google Earth.

E. Estadísticos de evaluación

Se utilizaron los siguientes índices estadísticos. MBE (Mean Bias Error) es un indicador de la desviación media entre el modelo y da cuenta para saber si el modelo sobrestima ($MBE > 0$) o subestima ($MBE < 0$) las medidas [5], [39], está definido como.

$$MBE_{\%} = \frac{100}{\bar{I}_{med}} \frac{\sum_{i=1}^n (I_{cal,i} - I_{med,i})}{n} \% \quad (5)$$

MABE (Mean Bias Absolute Error) Es un parámetro utilizado para evaluar el grado de ajuste del modelo a las mediciones [40]. Se define de la forma siguiente:

$$MABE_{\%} = \frac{100}{\bar{I}_{med}} \frac{\sum_{i=1}^n |I_{cal,i} - I_{med,i}|}{n} \% \quad (6)$$

RMSE (Root Mean Square Error) también es un indicador estadístico que analiza cómo se ajusta el modelo a las medidas [41], se define como:

$$RMSE_{\%} = \frac{100}{\bar{I}_{med}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{cal,i} - I_{med,i})^2}{n}} \% \quad (7)$$

Coficiente de determinación (8) y correlación (9)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (I_{med,i} - \bar{I}_{med,i})(I_{cal,i} - \bar{I}_{cal,i}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (I_{med,i} - \bar{I}_{med,i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (I_{cal,i} - \bar{I}_{cal,i})^2 \right]} \quad (8)$$

$$r = \sqrt{R^2} \quad (9)$$

Dónde: I_{cal} y I_{med} representan los valores calculados y medidos, $\bar{I}_{cal}$, $\bar{I}_{med}$ son los valores promedio calculado y medido, n número de datos [42], [43].

La literatura clasifica los indicadores estadísticos MABE y RMSE según el siguiente criterio: Excelente, si $RMSE < 10\%$; Bueno, cuando $10\% < RMSE < 20\%$; Regular, si $20\% < RMSE < 30\%$; deficiente, si $RMSE > 30\%$ [39], [41]. De manera análoga, en el caso del indicador estadístico MABE [41].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 se muestra los datos promedio diarios del comportamiento IUV y la Rad en la ciudad de Puno para condiciones de cielos despejados, parcialmente nublados y nublados. Los datos diarios fueron analizados estadísticamente para identificar el comportamiento estacional característico de la región, evidenciándose una relación entre dichas variables.

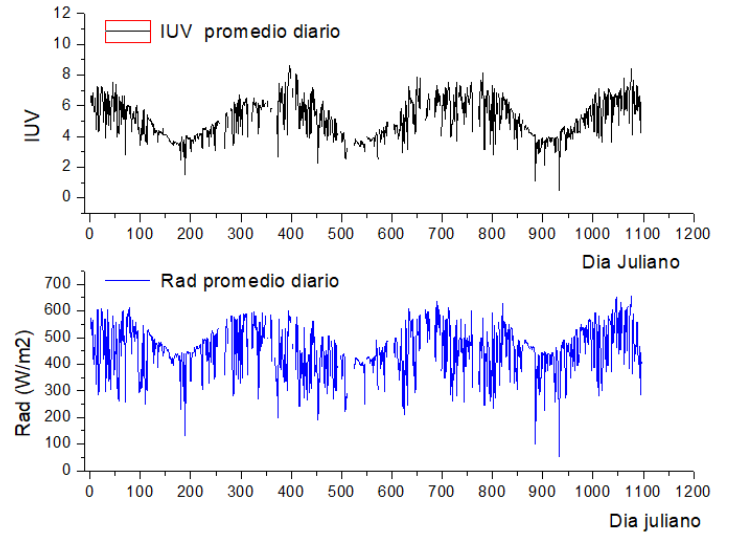


Fig. 3 IUV y la Rad para el periodo 2016 – 2018.

La figura 4 muestra el comportamiento temporal de los valores máximos diarios del IUV y los valores máximos diarios de la Rad, durante el periodo de estudio

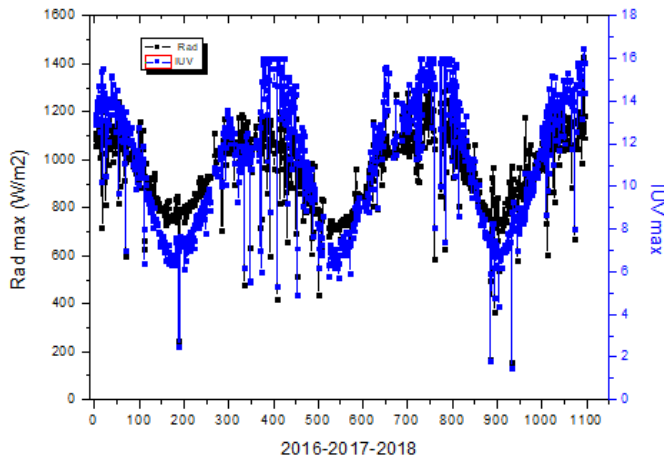


Fig. 4 Valores máximos diarios del IUV, Rad durante el periodo de medidas.

Se observa cierta relación entre el IUV y Rad. La presencia de nubes modifica la relación entre dichas variables, como moléculas de agua, también se observa un comportamiento periódico sinusoidal, cabe mencionar que los valores máximos se dieron entre las 11:30 am y las 12:30 pm, otro detalle son la presencia de días anómalos (nevada) que se presentaron 07 de julio del 2016 $Rad_{max} = 244 \text{ W/m}^2$, $IUV_{max} = 2.4$; 03 de junio del 2018 $Rad_{max} = 170 \text{ W/m}^2$, $IUV_{max} = 1.8$; 21 de julio del 2018 $Rad_{max} = 156 \text{ W/m}^2$, $IUV_{max} = 1.5$.

Una restricción de la estación meteorológica es su límite máximo de medición para el IUV, establecido en 16. Esta limitación se hace evidente en los valores más altos del IUV, especialmente durante los meses de enero y febrero, cuando SENAMHI ha reportado valores superiores a dicho umbral. Una comparación del IUV máximo diario para días sin presencia de nubes o ligeramente nublado con respecto al signo opuesto de la declinación solar se muestra en la siguiente figura 5.

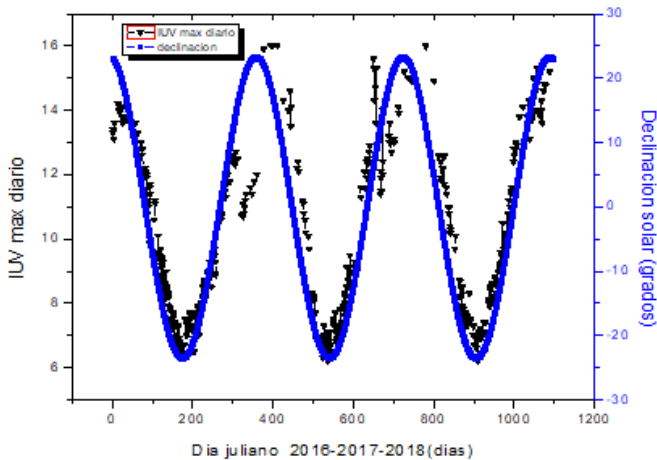


Fig. 5 Declinación solar e IUV máximo diario.

El coeficiente de determinación entre el IUV máximo diario y la declinación solar no es muy buena, salvo para el periodo 2018 ($R^2 = 0.99$). Este valor indica que la declinación solar es

un factor geométrico importante que modula los valores del IUV máximo diario, por otro lado, se sabe que la declinación está relacionada directamente con el cambio estacional.

La figura 6 muestra del comportamiento promedio mensual del IUV en el periodo de estudio y su respectivo ajuste confirmando el análisis estadístico de la distribución mensual mencionado en los párrafos anteriores, siendo el coeficiente de determinación 0.985.

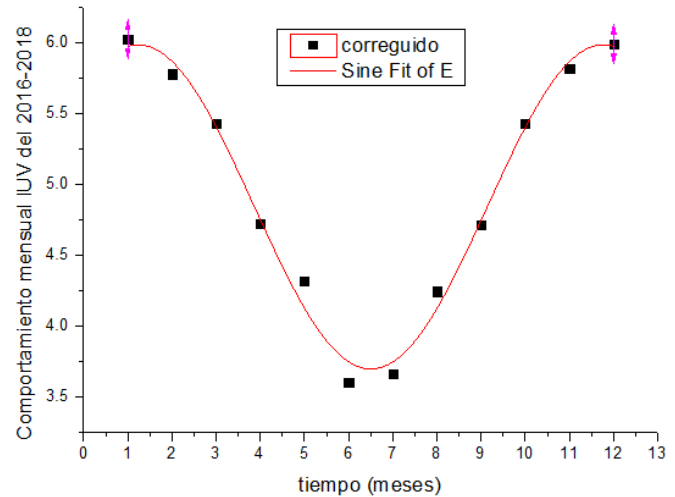


Fig. 6 Comportamiento mensual del IUV desde enero 2016 hasta diciembre 2018.

El comportamiento mostrado en la figura 6 revela que el IUV alcanza valores elevados durante los meses de enero y febrero. A partir de marzo, comienza a disminuir hasta llegar a sus niveles más bajos en la estación de invierno (junio y julio). Posteriormente, en agosto, inicia un ascenso, alcanzando nuevamente valores altos en noviembre y diciembre, repitiéndose así el ciclo anual.

Para los días sin presencia de nubes, la relación entre el IUV y Rad global durante el periodo de medidas muestra una expresión de la forma

$$IUV = A \times Rad^B \quad (10)$$

En la siguiente tabla 1 se muestra en resumen la aplicación de la ecuación (10).

TABLA I
RELACIÓN ANUAL DEL IUV Y LA RAD

Año	Formula	R^2	SD
2016	$IUV = 5.62533 \times 10^{-5} \times Rad^{1.76416}$	0.998	$A = 1.7695E-6$ $B = 0.00456$
2017	$IUV = 1.20587 \times 10^{-5} \times Rad^{2.0003}$	0.982	$A = 5.18461E-7$ $B = 0.00616$
2018	$IUV = 3.9855 \times 10^{-6} \times Rad^{2.16579}$	0.990	$A = 8.38662E-8$ $B = 0.00301$

El coeficiente de determinación indica un buen compromiso entre ambas variables como se muestra en la figura 6, por tanto, esta relación permite estimar el IUV a partir de la medición de Rad para cielos sin presencia de nubes, debemos mencionar que

dicha relación es de carácter local, los resultados no se pueden extrapolar a otras ciudades. La figura 7 muestra en compromiso aceptable entre el IUV y la Rad

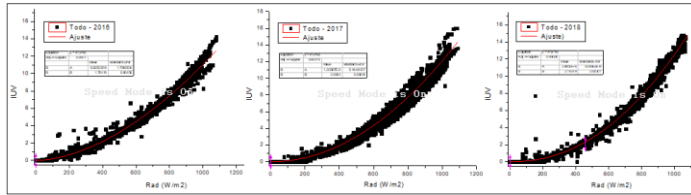


Fig. 7 IUV, Rad años 2016, 2017 y 2018

Fuente: Elaboración en base a los datos proporcionados por la estación meteorológica.

La literatura muestra que existen diversas relaciones entre la irradiación ultravioleta (UVER) y la radiación solar total (Rad) de forma lineal; $UVER = a \cdot Rad$ [44]–[46].

A continuación, se lleva a cabo la programación en Fortran de la ecuación (4) para cielos despejados, lo que permite obtener un modelo empírico del IUV para la ciudad de Puno. La figura 8 presenta la correlación entre los valores medidos y los calculados para un día en particular.

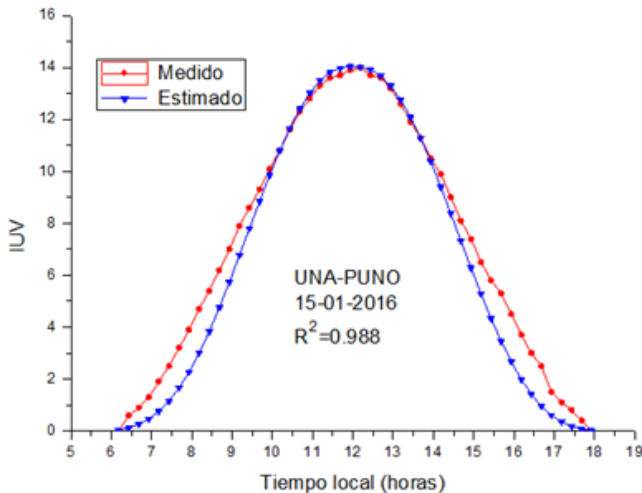


Fig. 8 Comparación de los valores medidos y estimados.

Los resultados de la estimación del IUV para días sin nubes presentan un coeficiente de determinación promedio de 0.988. Utilizando la expresión (4) para cielos con presencia de nubes los resultados muestran buen compromiso entre los valores calculados y medidos. A continuación, se muestran la comparación para algunos días en la figura 9.

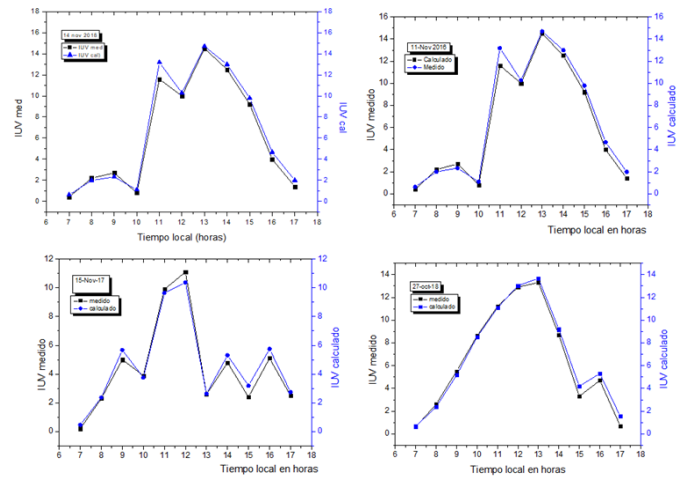


Fig. 9 Comparación del IUV calculado y medido para algunos días del periodo de medidas.

La importancia de la fórmula empírica (4) para estimar el IUV para cielos con la presencia de nubes, es que depende la radiación solar global medida y el ángulo cenital, mientras que los valores calculados. Esto se pone de manifiesto en el precio, debido a que es más económico disponer un equipo que pueda medir Rad respecto a un equipo que mide el IUV. También otra aplicación importante es que permite reconstruir el comportamiento del IUV en series de tiempo, en un determinado lugar.

Cabe mencionar en la literatura [47], aplica la ecuación (4) para obtener la relación del UVER con la Rad y el ángulo cenital obteniendo buenos resultados. Los indicadores estadísticos, se indican en la tabla 2, parámetros estadísticos del IUV (cada 15 minutos) para cielos con presencia de nubes año durante el periodo de mediciones.

TABLA II PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL IUV						
Días	Datos	MBE (%)	MABE (%)	RMSE (%)	R ²	r
310	6648	-7,1	9,2	11,2	0.97	0.984

El valor negativo del MBE indica que el modelo tiende a subestimar las mediciones. Por otro lado, los valores del RMSE y el MABE sugieren que el modelo tiene un buen ajuste con respecto a las mediciones, con un coeficiente de determinación de 0.97.

IV. CONCLUSIONES

El análisis estadístico del comportamiento del IUV y la radiación solar global durante el periodo de estudio evidencia un patrón cíclico. Se observa que los valores del IUV alcanzan sus niveles más altos en la estación de verano, particularmente en enero y febrero, mientras que disminuyen progresivamente en invierno, registrando sus valores mínimos en junio y julio. Posteriormente, estos valores vuelven a incrementarse en noviembre y diciembre, completando así el ciclo anual.

Se ha identificado una alta correlación entre las mediciones del IUV y la radiación solar global en condiciones de cielo despejado, con coeficientes de 0.998, 0.982 y 0.990 para los años 2016, 2017 y 2018, respectivamente. Estos resultados sugieren que la radiación solar global puede utilizarse como un predictor confiable del IUV.

El modelo propuesto para la estimación del IUV en cielos despejados presenta un alto grado de ajuste con los datos observados, con una correlación aproximada de 0.988. Asimismo, el modelo desarrollado para condiciones de nubosidad muestra una correspondencia significativa con las mediciones, alcanzando una correlación de 0.984 durante el periodo de estudio. Estos hallazgos respaldan la fiabilidad de los modelos propuestos para la estimación del IUV en distintas condiciones atmosféricas.

REFERENCIAS

- [1] J. Santos, «Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation», *Int. J. Climatol.*, vol. 31, n.º 3, pp. 451-460, 2011.
- [2] I. Foyo, «The influence of cloudiness on UV global irradiance (295-385 nm)», *Agric. For. Meteorol.*, vol. 120, n.º 1-4, pp. 101-111, 2003.
- [3] Keppler, «Ultraviolet-radiation-induced methane emissions from meteorites and the Martian atmosphere», *Nature*, vol. 486, n.º 7401, pp. 93-96, 2012.
- [4] Gray, «Solar influences on climate», *Rev. Geophys.*, vol. 48, n.º 4, 2010.
- [5] Wang, «UV variability in an arid region of Northwest China from measurements and reconstructions», *Int. J. Climatol.*, vol. 35, n.º 8, pp. 1938-1947, 2014.
- [6] Koepke, «Solar UV radiation and its variability due to the atmospheric components», *Recent Res. Dev. Photochem. Photobiol.*, vol. 6(11), p. e34, 2002.
- [7] Di Sarra, «Effects of desert dust and ozone on the ultraviolet irradiance at the Mediterranean island of Lampedusa during PAUR II», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 107, n.º 18, p. PAU 2-1-PAU 2-14, 2002.
- [8] Jacquet, «Effects of ultraviolet radiation on marine virus-phytoplankton interactions», *FEMS Microbiol. Ecol.*, vol. 44, n.º 3, pp. 279-289, 2003.
- [9] Sweet, «Evidence of melanoma in wild marine fish populations», *PLoS One*, vol. 7, n.º 8, 2012.
- [10] Paoletti, «UV-B and Mediterranean forest species: Direct effects and ecological consequences», *Environ. Pollut.*, vol. 137, n.º 3, pp. 372-379, 2005.
- [11] Kunz, «Plant Responses to UV Radiation and Links to Pathogen Resistance», *Int. Rev. Cytol.*, vol. 255, n.º 06, pp. 1-40, 2006.
- [12] Li, «A meta-analysis of the responses of woody and herbaceous plants to elevated ultraviolet-B radiation», *Acta Oecologica*, vol. 36, n.º 1, pp. 1-9, 2010.
- [13] Sinha, «Life under solar UV radiation in aquatic organisms», *Adv. Sp. Res.*, vol. 30, n.º 6, pp. 1547-1556, 2002.
- [14] Pahkala, «Effects of ultraviolet-B radiation on behaviour and growth of three species of amphibian larvae», *Chemosphere*, vol. 51, n.º 3, pp. 197-204, 2003.
- [15] J. Rozema *et al.*, «The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems-An experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds», *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 66, n.º 1, pp. 2-12, 2002.
- [16] Liu, «Effect of carbon black on UV stability of LLDPE films under artificial weathering conditions», *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 75, n.º 3, pp. 485-499, 2002.
- [17] Verbeek, «Degradation as a result of UV radiation of bloodmeal-based thermoplastics», *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 96, n.º 4, pp. 515-522, 2011.
- [18] Johnson, «Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings», *Prog. Org. Coatings*, vol. 27, n.º 1-4, pp. 95-106, 1996.
- [19] Allen, «Photocatalytic titania based surfaces: Environmental benefits», *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, n.º 9, pp. 1632-1646, 2008.
- [20] Gallagher, «Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review», *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 92, n.º 1, pp. 119-131, 2006.
- [21] Fioletov, «On the relationship between erythral and vitamin D action spectrum weighted ultraviolet radiation», *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 95, n.º 1, pp. 9-16, 2009.
- [22] J. Bilbao y A. de Migue, «Erythral solar irradiance, UVER, and UV index from ground-based data in central Spain», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 18, 2020.
- [23] M. S. Al-musaylh *et al.*, «Multi-step solar UV index prediction using deep learning methods», *Res. Artic.*, 2023.
- [24] A. T. Natasha, «Wearable UV Detector for Real Time UV Index Monitoring», Macquarie University, 2022.
- [25] WHO, «Index UV Solar Mundial», 2003.
- [26] N. J. Dedios Mimbela, «Radiación ultravioleta. Análisis de su comportamiento estacional en diferentes sectores de la región Piura. Costa Norte del Perú», *Ing. USBmed*, vol. 7, n.º 1, p. 26, 2016.
- [27] A. Tanskanen *et al.*, «Validation of daily erythral doses from Ozone Monitoring Instrument with ground-based UV measurement data», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 112, pp. 1-15, 2007.
- [28] V. Buchard *et al.*, «Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites To cite this version : HAL Id : hal-00328314 Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites», *Atmos. Chem. Phys. Discuss. Eur. Geosci. Union*, vol. 8, n.º 2, pp. 4309-4351, 2008.
- [29] M. Antón *et al.*, «Comparison of UV irradiances from Aura / Ozone Monitoring Instrument (OMI) with Brewer measurements at El Arenosillo (Spain) – Part 1 : Analysis of parameter influence», *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, pp. 6797-6827, 2010.
- [30] Serrano, «Daily and annual variations of erythral ultraviolet radiation in Southwestern Spain», *Ann. Geophys.*, vol. 24, n.º 2, pp. 427-441, 2006.
- [31] J. Cañada, «Study of erythral, UV (A+B) and glob», *Int. J. Climatol.*, vol. 2029, n.º March 2008, pp. 2011-2029, 2008.
- [32] Pribullová, «Typical distribution of the solar erythral UV radiation over Slovakia», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, n.º 17, pp. 5393-5401, 2008.
- [33] Badarinath, «Influence of natural and anthropogenic activities on UV Index variations - A study over tropical urban region using ground based observations and satellite data», *J. Atmos. Chem.*, vol. 59, n.º 3, pp. 219-236, 2008.
- [34] A. McKinley y B. Diffey, «A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin», *CIE*, vol. 6, pp. 17-22, 1987.
- [35] C. W. Taipei *et al.*, «Analysis of the ultraviolet index in the region of Análisis del índice ultravioleta en la región de Puno , Perú», en *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 2023, pp. 1-8.
- [36] S. Madronich y S. Flocke, «Theoretical Estimation of Biologically Effective UV Radiation at the Earth's Surface», *Sol. Ultrav. Radiat.*, vol. 1, pp. 23-48, 1997.
- [37] A. Lindfors *et al.*, «A method for reconstruction of past UV radiation based on radiative transfer modeling: Applied to four stations in northern Europe», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 112, n.º D23, pp. 1-15, dic. 2007.
- [38] NREL, «SMARTS: Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine», *National Renewable Energy Laboratory*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/>. [Accedido: 12-feb-2025].
- [39] Mao, «General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China», *Energy Convers. Manag.*, vol. 70, pp. 139-148, 2013.
- [40] Martinez, «Measurement and Analysis of Ultraviolet Solar», *Int. J.*, vol. 16, pp. 947-955, 1996.
- [41] Yanfeng, «Classification of solar radiation zones and general models for estimating the daily global solar radiation on horizontal surfaces in China», *Energy Convers. Manag.*, vol. 154, n.º September, pp. 168-179, 2017.
- [42] S. Alexandris, P. Kerkides, y A. Liakatas, «Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach», *Agric. Water Manag.*, vol. 82, n.º 3, pp. 371-386, 2006.
- [43] H. Tabari, «Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates», *Water Resour. Manag.*, vol. 24, n.º 10, pp. 2311-2337, 2010.
- [44] Cañada, «Influences of the clearness index for the whole spectrum and of the relative optical air mass on UV solar irradiance for two locations in the

- Mediterranean area, Valencia and Cordoba», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 105, n.º D4, pp. 4759-4766, 2000.
- [45] J. Martinez, «Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain», *Int. J. Climatol.*, vol. 19, n.º 8, pp. 903-911, 1999.
- [46] Foyo, «Ground based ultraviolet (290-385 nm) and broadband solar radiation measurements in south-eastern Spain», *Int. J. Climatol.*, vol. 18, n.º 12, pp. 1389-1400, 1998.
- [47] Miguel, «Measurements and attenuation of erythema radiation in Central Spain», *Int. J. Climatol.*, vol. 32, n.º 6, pp. 929-940, 2011.