

Modelado matemático del índice ultravioleta en la ciudad de San Lorenzo, Paraguay**Mathematical modeling of the ultraviolet index in San Lorenzo city, Paraguay**Abel Delgado¹ & Fernando Mendez²¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica. Email: abdelgav@gmail.com²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Email: fmendez@facen.una.py

Resumen: La radiación solar ultravioleta (UV) tiene una importante acción biológica sobre el cuerpo humano. En esta investigación se analizó la variación de los niveles máximos diarios y mensuales de irradiación eritemática para determinar los niveles máximos diarios y mensuales del Índice Ultravioleta, en inglés *UV Index* (UVI), en la Ciudad de San Lorenzo, Paraguay, en días claros durante el periodo 2006 - 2009. Los datos de radiación ultravioleta eritemática fueron adquiridos de la Estación Meteorológica del Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), Universidad Nacional de Asunción (UNA). Dichos datos fueron medidos por un piranómetro modelo UVB-1 de la firma Yankee Environmental Systems (YES). Se realizó un modelado matemático de la serie mensual del UVI mediante la expansión en serie de Fourier. Se pudo observar que los valores del UVI alcanzan una intensidad extremadamente alta (12 unidades) durante el verano, y una intensidad moderada (4 unidades) en invierno. Mediante el estudio del comportamiento de los niveles del UVI, la población puede estar informada acerca de la peligrosidad ante la exposición prolongada a la radiación UV.

Palabras clave: *Irradiancia eritemática; UV Index; días claros; modelado matemático.*

Abstract: Ultraviolet (UV) solar radiation has an important biological action on the human body. In this research, the variation of the maximum daily and monthly levels of erythemal irradiance was analyzed to determine the maximum daily and monthly levels of the Ultraviolet Index (UVI), in the City of San Lorenzo, Paraguay, on clear days during the period 2006 - 2009. The erythemal ultraviolet radiation data was acquired from the Meteorological Station of the Laboratory for Atmospheric and Environmental Problems Research (LIAPA) of the Faculty of Exact and Natural Sciences (FACEN), National University of Asunción (UNA). These data were measured by a pyranometer model UVB-1 from Yankee Environmental Systems (YES). A mathematical modeling of the monthly series of the UVI was performed through the Fourier series expansion. It was observed that the values of the UVI reach an extremely high intensity (12 units) during the summer, and a moderate intensity (4 units) in winter. By studying the behavior of UVI levels, the population can be informed about the danger of prolonged exposure to UV radiation.

Keywords: *Erythemal irradiance; UV Index; clear days; mathematical modeling.*

Introducción

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético, la cual abarca las longitudes de onda comprendidas entre 100 y 400 nm. Está conformada por tres bandas, estas son la radiación ultravioleta tipo C (UV-C), tipo B (UV-B) y tipo A (UV-A) (WHO, 2002). Se describe cada tipo a continuación.

La radiación UV-C (100 – 280 nm) es la más energética de las radiaciones ultravioleta. Esta radiación es absorbida completamente en la alta atmósfera por el oxígeno molecular, y en la baja atmósfera por el ozono estratosférico.

La radiación UV-B (280 – 315 nm), aunque absorbida en gran parte por el ozono estratosférico, penetra hasta la superficie terrestre en un pequeño porcentaje, alrededor del 10%. Esta cantidad de radiación que alcanza la superficie, daña la piel humana y produce enfermedades oculares, entre otras dolencias.

La radiación UV-A (315 – 400 nm) penetra hasta la superficie terrestre casi en su totalidad, siendo la menos energética de las radiaciones ultravioleta.

Entonces, la radiación UV que alcanza la superficie está compuesta en mayor medida por la

Recibido: 20/8/2013 Aceptado: 23/12/2018



radiación UV-A, y en menor medida por la radiación UV-B.

La radiación UV es beneficiosa para la piel humana en pequeñas dosis, porque estimula la producción de vitamina D. Sin embargo, la exposición continua y prolongada a esta radiación, puede producir enfermedades desde quemaduras cutáneas hasta la aparición de diversos tipos de cáncer de piel, además de dolencias oculares como las cataratas. Las personas de piel blanca y ojos claros, son especialmente vulnerables a la radiación UV (Corrêa, 2003).

El *UV Index* (UVI), es una medida del nivel de radiación UV que llega hasta la superficie terrestre. El UVI es un índice adimensional definido como 40 veces la irradiancia eritémica (W/m^2), tal como lo ha establecido la Organización Mundial de la Salud (WHO). Sus valores son expresados como números enteros, generalmente de 1 a 11 o más. Cuanto más altos son sus valores, mayores son los riesgos de desarrollar enfermedades en la piel y en los ojos en los seres humanos. Este índice es un importante método de alerta acerca de la necesidad de la foto protección (WHO, 2002).

En la Tabla 1 se observa las diferentes categorías de exposición a la radiación ultravioleta según WHO. Cuando el UVI arroja valores por debajo de 2, la categoría de exposición se considera baja; entre 3 y 5, es moderada; entre 6 y 7, es alta; entre 8 y 10, muy alta; 11 o más, extrema.

En la Ciudad de San Lorenzo, Paraguay, se ha realizado el análisis de varios métodos estadísticos utilizando regresión lineal aplicado a la serie temporal de la radiación UV-B durante el periodo 1997-2012, en el que esta variable demuestra un comportamiento del tipo sinusoidal, es decir, con máximos en verano y mínimos en invierno (Amarilla, 2015).

En otro estudio se ha realizado un análisis de la irradiancia eritémica basado en modelos de series temporales para determinar los niveles del UVI en el Departamento Central de Paraguay, durante el periodo 1997-2011. Se determinó que la serie de valores máximos diarios del UVI presenta una leve tendencia decreciente a partir del año 2000.

Tabla 1. Categorías de exposición a la radiación ultravioleta (adaptada de WHO, 2002).

Categoría de exposición	UV Index
Baja	≤ 2
Moderada	3 – 5
Alta	6 – 7
Muy alta	8 – 10
Extrema	≥ 11

Además, se observó que el UVI alcanza niveles máximos diarios muy elevados en meses estivales y bajos en meses invernales (Diaz, 2016).

Materiales y métodos

Se utilizó la base de datos de radiación UV-B eritémica (mW/m^2) de la Estación Meteorológica del Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA). Dichos datos fueron obtenidos mediante un piranómetro modelo UVB-1 de la firma Yankee Environmental Systems (YES), los cuales fueron almacenados en planillas electrónicas formato EXCEL. Esta base cuenta con datos de irradiancia eritémica promediados cada 15 minutos.

El piranómetro UVB-1 es un sensor de banda ancha con un intervalo espectral que abarca longitudes de onda entre 280 y 320 nm, con respuesta coseno de $\pm 5\%$ para un ángulo cenital inferior a 60° . Debido a sus características, es ideal para operar durante periodos relativamente largos sin necesidad de mantenimiento. Su rango de temperatura es de $\pm 40^\circ C$. El instrumento estuvo operativo desde el año 1996 y su última calibración tuvo lugar en noviembre de 2010 (Diaz, 2016).

Para el estudio, se seleccionó los días claros correspondientes al periodo 2006 – 2009. Esto se logró graficando la irradiancia UV-B diaria, promediada cada 15 minutos, en función del tiempo UTC (universal time coordinated). Cuando la gráfica presentaba una forma de campana, el día se

consideraba con cielo claro. Mediante el método propuesto, se pudo determinar la cantidad de 233 días claros para el periodo de estudio.

Una vez identificados todos los días claros para el periodo de estudio, se determinó los valores diarios máximos de radiación UV-B. Utilizando la definición del UVI (WHO, 2002), se halló el valor máximo diario del UVI correspondiente a cada día claro multiplicando la irradiancia eritémica máxima diaria por una constante igual a 40.

Utilizando los valores máximos diarios del UVI para días claros, se aplicó la media aritmética para el cálculo de los valores máximos medios mensuales. Se realizó el modelado matemático de la serie de los niveles máximos medios mensuales del UVI utilizando el teorema de Fourier, apto para modelar series periódicas como el UVI.

Para el análisis y el procesamiento de los datos, se utilizó el lenguaje estadístico R.

Resultados y discusión

En la Figura 1 se observa la variación anual de los niveles máximos diarios del UVI en el periodo 2006 – 2009. Es posible visualizar que la intensidad del UVI es moderada (3 - 5) desde los inicios de mayo hasta finales de julio; alta (6 - 7) en abril y en agosto; muy alta (8 - 10) en marzo y en los inicios de setiembre hasta finales de octubre; y extrema (11+) de noviembre a febrero. La media de los niveles máximos diarios del UVI para el verano (diciembre, enero y febrero) es 12 unidades (intensidad extremadamente alta), y la media

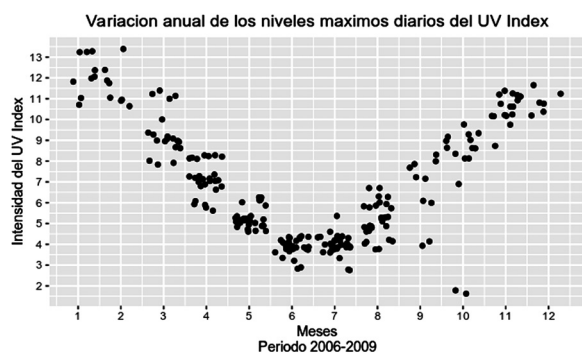


Figura 1. Variación anual de los niveles máximos diarios del UVI en el periodo 2006 – 2009.

Modelado matemático del UV Index en función del tiempo

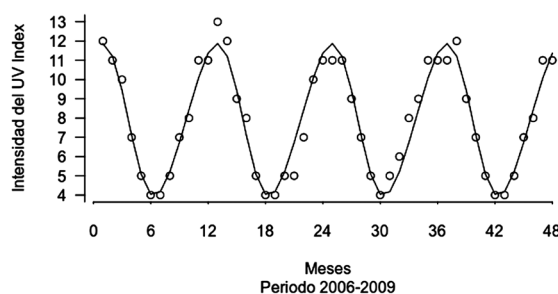


Figura 2. Modelado matemático de los niveles máximos medios mensuales del UVI en función del tiempo en meses en el periodo 2006-2009.

para invierno (junio, julio y agosto) es 4 unidades (intensidad moderada).

Al considerar la serie de los niveles máximos medios mensuales del UVI, fue posible notar que el periodo que le toma a la serie en completar un ciclo entero es igual a 12 meses. Para modelar esta serie de tiempo, se aplicó el Teorema de Fourier, el cual es una herramienta matemática para el análisis de funciones periódicas a través de la descomposición de la función en una suma de funciones sinusoidales más simples, es decir, como una combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras.

En la Figura 2 puede observarse el modelado matemático de los niveles máximos medios mensuales del UVI en función del tiempo en meses en el periodo 2006 - 2009. El modelo matemático resultante está representado por la línea continua y, tal como puede observarse, se ajusta bastante bien al comportamiento de la serie.

La ecuación resultante es:

$$UVI_t = 1.36 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right) + 3.67 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12}t\right) + 0.25 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{12}t\right) + 7.89$$

Donde:

UVI_t es el nivel máximo medio mensual del UVI para el periodo 2006-2009.

t es el tiempo en meses (1 a 48) del periodo 2006-2009.

Esta expresión es la expansión en serie de Fourier de la función periódica UVI_t . La misma relaciona la variación del nivel máximo medio mensual del UVI a partir de cierto mes de la serie

comprendida entre 1 y 48 meses.

El coeficiente de determinación R^2 del modelo es igual a 0.949. El error estándar es 0.647. El p-valor es 2.2×10^{-16} . El modelo se ajusta muy bien al comportamiento de la serie, con una bondad de ajuste del 95%.

Conclusiones

Los niveles máximos medios mensuales del UVI se comportan como una serie temporal del tipo sinusoidal, con máximos en verano y mínimos en invierno. La media mensual anual para el verano es igual a 12 unidades (intensidad extremadamente alta), y la media mensual anual para el invierno es igual a 4 unidades (intensidad moderada). Se ha detectado una tendencia ligeramente decreciente en la serie.

La serie de los niveles máximos medios mensuales del UVI puede considerarse como una función periódica con periodo $T = 12$ meses. Se encontró que esta serie puede ser modelada mediante la expansión en serie de Fourier.

Los niveles extremos de radiación UV son muy peligrosos especialmente para las personas de piel blanca, ya que la exposición prolongada a esta radiación, es capaz de producir eritemas y quemaduras severas, como también propiciar el desarrollo de cáncer de piel y cataratas oculares.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción, por los datos suministrados.

Literatura citada

- Amarilla, C. (2015). Modelización de la radiación ultravioleta tipo B total en la Ciudad de San Lorenzo - Paraguay. *Reportes Científicos de La FaCEN*, 6(2): 5–21.
- Corrêa, M. P. (2003). *Índice ultravioleta: Avaliações e aplicações* (Tesis de Doctorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Diaz, V. (2016). Caracterización de la irradiancia eritemica diaria basada en modelos de series temporales y determinación del Índice UV en el Departamento Central del Paraguay. *Reportes Científicos de La FaCEN*, 7(2): 32–38.
- World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). *Global solar UV index: a practical guide*. World Health Organization.