

COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE DERIVACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR EFECTIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE PRE-VITAMINA D₃ EN LA PIEL, EN LA CIUDAD DE ROSARIO, ARGENTINA

COMPARISON OF THREE DERIVATION METHODS OF EFFECTIVE SOLAR IRRADIANCE FOR THE PRODUCTION OF PRE-VITAMIN D₃ ON THE SKIN, IN ROSARIO, ARGENTINA

Montserrat Dávalos¹, Adriana Ipiña^{*2}, Gamaliel Lopez-Padilla³, and Rubén D. Piacentini²

¹Investigadora Independiente - Monterrey (64810) - México

²Instituto de Física Rosario (IFIR) – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – Rosario (S2000EKF) – Argentina

³Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N - Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza (66451) – México.

Recibido: xx/xx/xx; Aceptado: xx/xx/xx

En los últimos años, el interés por el estudio de la vitamina D ha aumentado debido al incremento en la incidencia de personas que presentan niveles deficientes de esta vitamina. Pocos alimentos la contienen de manera natural, siendo la principal fuente de obtención la radiación solar UV, la cual desencadena el mecanismo de la producción de la vitamina D a través de la piel. En este estudio se determinó la irradiancia solar UV efectiva para la producción de pre-vitamina D₃ en la ciudad de Rosario, Argentina, utilizando tres métodos: a) Coeficiente de proporcionalidad, b) Ecuación de Herman y c) Modelo TUV. Los valores se compararon para condiciones de cielo despejado al mediodía solar. El cálculo de los tiempos de exposición solar (TES) se optimizó mediante un código python con el fin de obtener las dosis mínimas de pre-vitamina D₃ y eritema, diariamente en el periodo junio 2019 - mayo 2020. Se discute la variación de los TES que alcanzan la dosis mínima de pre-vitamina D₃ con una exposición del 25 % del cuerpo (cara, cuello y brazos).

Palabras Clave: radiación solar UV, vitamina D, dosis, tiempos de exposición, Argentina.

In the last years, interest in the study of vitamin D has raised due to the increase in the incidence of people with deficient levels of this vitamin. Few foods contain it naturally, being the main source of obtaining the UV solar radiation, which triggers the mechanism of the production of vitamin D through the skin. In this study, the effective UV solar irradiance for the production of pre-vitamin D₃ was determined in Rosario city, Argentina, using three methods: a) Coefficient of proportionality, b) Herman equation and c) TUV model. The values were compared in clear sky conditions at solar noon. The calculation of the solar exposure times (TES) was optimized by means of a python code in order to obtain the minimum doses of pre-vitamin D₃ and erythema, daily in the period june 2019 - may 2020. It is discussed the variation of the TES reaching the minimum dose of pre-vitamin D₃ with an exposure of 25 % of the body (face, neck and arms).

Keywords: UV solar radiation, vitamin D, doses, exposure times, Argentina.

I. INTRODUCCIÓN

La vitamina D participa en múltiples procesos en el cuerpo humano, interviene en la regulación de la homeostasis del calcio y el metabolismo en los huesos. La deficiencia de esta vitamina se asocia al incremento de algunos cánceres, enfermedades como el Parkinson, Alzheimer, entre otras.¹⁻³ Pocos alimentos contienen esta vitamina de manera natural, siendo la radiación solar la principal fuente de obtención. La radiación solar que llega a la

superficie terrestre varía esencialmente en función de la composición atmosférica, la ubicación geográfica, la hora del día y los días del año. La fracción ultravioleta (UV) es la más energética por fotón incidente (280-400 nm) y es la causante de desencadenar los efectos biológicos más importantes en la piel humana.⁴ Existen dos tipos de vitamina D generada a partir de la exposición solar UV: vitamina D₂ (ergocalciferol) formada en las plantas y vitamina D₃ (colecalciferol) producida en la piel.⁵ Cuando el precursor 7-dehidrocolesterol presente en la piel,

²ipina@ifir-conicet.gov.ar

entra en contacto con la radiación UV se convierte en pre-vitamina D₃. Esta última es excretada y viaja por el torrente sanguíneo hacia el hígado donde es hidroxilada, produciendo 1,25-hidroxivitamina D₃, la forma activa de la vitamina D.⁶

Por otro lado, la sobreexposición solar UV también puede producir efectos nocivos a largo plazo, que van desde el fotoenvejecimiento, fotodermatitis hasta cánceres de piel y cataratas.^{7,8} Por esta razón es de suma importancia determinar los tiempos de exposición solar para generar la pre-vitamina D₃ sin causar daño en la piel. Con este propósito se utiliza la definición de la dosis efectiva:

$$Dosis = \int_{t_1}^{t_2} \int_{200nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} d\lambda dt = \int_{t_1}^{t_2} E_t dt \quad (1)$$

donde E_{λ} es la irradiancia solar espectral a nivel del suelo, S_{λ} es el espectro de acción biológica y cuyo producto integrado en longitud de onda representa la irradiancia efectiva, E_t . Esta irradiancia de acuerdo a sus respectivos S_{λ} , definen las irradiancias de pre-vitamina D₃ (E_{vitD}) y eritémica (E_{er}).

La dosis mínima para mantener niveles adecuados de vitamina D₃ en una exposición de cuerpo completo es de 0.34 SDD (Dosis Estándar de vitamina D, SDD por sus siglas en inglés, equivalente a 100 J/m²). Para una exposición del 25 % del cuerpo (brazos, cuello y cara) la dosis mínima es de 136 J/m² y la dosis mínima para generar eritema en un fototipo de piel II es de 250 J/m², en la clasificación de Fitzpatrick.⁹ Ambas dosis se consideran como valores de referencia en este trabajo para determinar los tiempos de exposición solar (TES). Se presenta la estimación de la irradiancia solar efectiva para la producción de la vitamina D₃, comparando tres métodos: Coeficiente de proporcionalidad,¹⁰ Ecuación de Herman¹¹ y Modelo TUV.¹² En particular, los resultados obtenidos con el modelo TUV se utilizaron para calcular los TES correspondientes a cada efecto biológico, en la ciudad de Rosario, Argentina.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de la columna total de ozono (O₃) utilizados en este trabajo provienen de la Colección 3, OMTO3 v8.5, en Unidades Dobson (DU), medidos por el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) para las coordenadas de la ciudad de Rosario, Argentina. A bordo del satélite AURA-NASA, OMI realiza observaciones diarias en una superficie de 13x24 Km² en el nadir (disc.gsfc.nasa.gov). Por otro lado, se utilizó un espectroradiómetro Optronics-OL756 y la estación meteorológica DAVIS para mediciones in situ de E_{λ} e Índice UV, respectivamente. Ambos ubicados en el Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR), en la ciudad de Rosario.

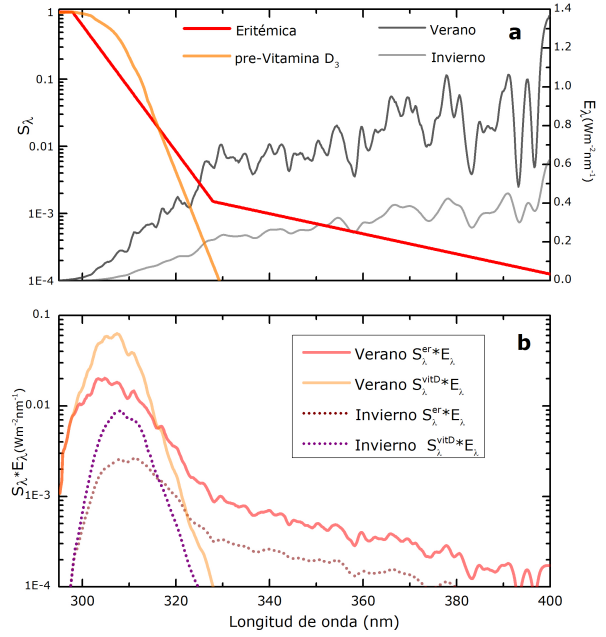


Figura 1: a) Espectros de acción de pre-vitamina D₃ y eritémica, e irradiancia espectral solar medida en cielo despejado, cerca de los solsticios de verano e invierno, en la ciudad de Rosario. b) Irradiancia ponderada por cada espectro de acción y estación del año.

Coeficiente de proporcionalidad

En un reporte¹⁰ de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) y la World Meteorological Organization (WMO) se mostró para una ciudad del hemisferio sur, la siguiente relación:

$$E_{vitD} = k \cdot E_{er} \quad (2)$$

con valores de k para verano e invierno. En este trabajo los k se determinaron a partir de E_{er} y E_{vitD} , calculadas con la Ec. 1 y mediciones de E_{λ} en la ciudad de Rosario (Fig. 1). Por medio de la Ec. 2 se obtuvo k igual a 1.6 en invierno y 2 en verano. Finalmente, mediciones al mediodía solar en cielo despejado de E_{er} (Índice UV entre 40) de la estación DAVIS, se multiplicaron por k para estimar E_{vitD} .

Ecuación de Herman

Herman¹¹ a partir de las E_{vitD} calculadas con el modelo TUV alrededor del mundo, obtuvo:

$$E_{vitD} = U \left(\frac{O_3}{200} \right)^{-RAF} \quad (3)$$

donde el O₃ es la columna total de ozono, RAF es el Factor de Amplificación de Radiación y U es la función de ajuste. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes para establecer las funciones de RAF y U, ambas dependientes del ángulo cenital solar (θ).

Modelo TUV

El modelo Tropospheric Ultraviolet Radiation (TUV) resuelve la ecuación de transferencia radiativa para determinar E_{λ} a nivel del suelo, en los rangos

Tabla 1: Coeficientes para obtener U y RAF en función del ángulo cenital solar (θ): $\frac{a+c\theta^2+e\theta^4}{1+b\theta^2+d\theta^4+f\theta^6}$ (adaptación de Herman¹¹).

	U	RAF
a	0.9659616883022778	1.349378286522954
b	0.0001089314449687077	-0.0002926808443875372
c	-0.0002681987275053843	-0.0003059282407232034
d	$1.410783665933483E^{-8}$	$2.879164470755759E^{-8}$
e	$1.894213900598701E^{-8}$	$1.920553492457117E^{-8}$
f	$1.695104643516458E^{-12}$	$-8.580442654658103E^{-13}$

ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. El modelo utiliza un perfil de aerosoles cuya profundidad óptica (AOD) es de 0.23 a 340 nm (desde 5.24 Km al espacio) y un perfil de O_3 correspondiente a la atmósfera estándar de EE. UU. Entre los datos de entrada más relevantes se encuentran las coordenadas geográficas del lugar, altura sobre el nivel del mar, AOD a 550nm, reflectividad del suelo, albedo de dispersión simple, coeficiente de Angstrom, fecha y hora del día. La columna total de O_3 ingresada tiene un valor climatológico de acuerdo a la medición diaria de OMI.

Con el modelo TUV también se calcularon los valores de E_{vitD} y E_{er} para la latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar (32.95°N, 60.62°O, 25 m) de la ciudad de Rosario, Argentina. Las iteraciones se realizaron para cada día, minuto a minuto entre las 11:00 - 15:00 h, en el periodo junio 2019 - mayo 2020. Posteriormente se seleccionaron las irradiancias al mediodía solar.

Cálculo de los TES

Por medio de un código en python y la Ec. 1 se calcularon los TES, utilizando las irradiancias E_{vitD} y E_{er} derivadas del modelo TUV. Se integraron las irradiancias en intervalos $t_2 - t_1$ hasta alcanzar las dosis mínimas en fototipo II, necesarias para la producción de vitamina D_3 y la aparición de eritema. Se consideró el comienzo de la exposición a las 11 h y se repitió la operación diariamente, revelando así el intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ para generar cada efecto a lo largo de un año.

III. RESULTADOS

La irradiancia pre-vitamina D_3 calculada al mediodía solar empleando los tres métodos se muestra en la Fig. 2. Como puede observarse, existe una razonablemente alta similitud entre los resultados obtenidos con la Ec. de Herman y con el modelo TUV. La diferencia relativa promedio fue de 13.5 % en verano y de 14.6 % en invierno, respecto al TUV. Mientras que las diferencias relativas en razón del Coeficiente de proporcionalidad con el TUV y la Ec. de Herman fueron de: 17.1 % y 8.4 % en invierno, así como de 36.2 % y 17.1 % en verano, respectivamente.

Para una exposición que comienza a las 11 h, en el periodo junio 2019 - mayo 2020 se estimaron los TES

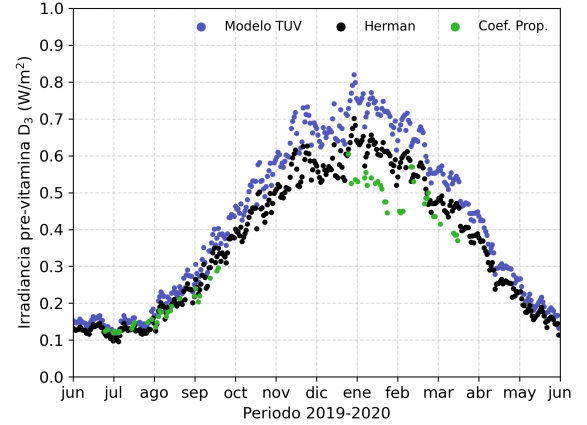


Figura 2: Irradiancia de pre-vitamina D_3 para la ciudad de Rosario, obtenida con: Coeficiente de proporcionalidad, Ec. de Herman y Modelo TUV.

a partir de los resultados obtenidos con el modelo TUV (la Fig. 3). En invierno, los TES para comenzar a producir pre-vitamina D_3 en personas con fototipo II, se encuentran en promedio a los 20 ± 7 minutos y para la aparición de eritema a los 54 ± 16 minutos. En verano, en promedio se requieren 5 ± 1 minutos para alcanzar la dosis mínima de pre-vitamina D_3 y 19 ± 3 minutos para la eritémica.

IV. CONCLUSIONES

El modelo TUV y la Ec. de Herman mostraron valores semejantes de irradiancia pre-vitamina D_3 debido a que ambos métodos consideran el O_3 y el θ como principales elementos de influencia. Además, particularmente en la ciudad de Rosario, las concentraciones de SO_2 y NO_2 no varían significativamente a lo largo del año. Sin embargo, los aerosoles pudieran tener una importante contribución en la atenuación del UV entre mayo-agosto cuando suelen tener lugar incendios en el delta del río Paraná frente a Rosario.¹³ Respecto al método basado en el Coeficiente de proporcionalidad, aunque su aplicación resulta más simple, la precisión depende de los valores de k para cada época del año. En verano, este último subestima la magnitud de la irradiancia pre-vitamina D_3 con respecto a los otros dos métodos. Un estudio basado en mediciones in situ en la ciudad de Buenos Aires (a 300 km de Rosario), reveló que en verano los TES para gene-

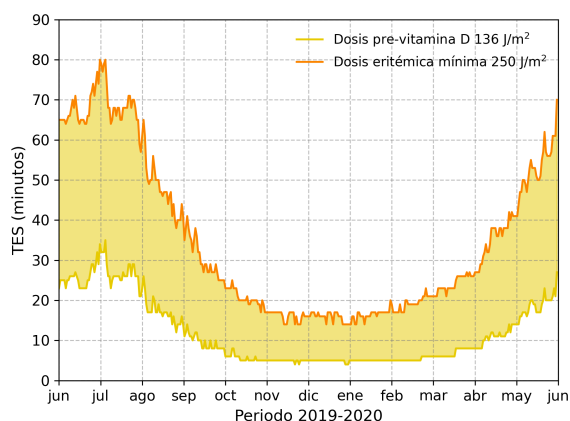


Figura 3: TES diarios para generar pre-vitamina D_3 (área amarilla) y límite para evitar eritema en una persona de un fototipo de piel II (curva naranja). TES comenzando a las 11 h con cielo despejado, en la ciudad de Rosario.

rar pre-vitamina D_3 y eritema, para fototipo II con una exposición del 9% (solo la cabeza), se alcanzaron los 13 min y 21 min, respectivamente.¹⁴ El TES para alcanzar la dosis mínima de vitamina D_3 difiere más del doble respecto a la estimación para la ciudad de Rosario (5 ± 1 min). El TES más largo en el primer caso se debe a que las mediciones no discriminan las condiciones de cielo y considera un área expuesta del cuerpo de menor tamaño. En contraste, los TES para alcanzar la dosis mínima eritémica (19 ± 3 min) son similares. El modelo TUV, la Ec. de Herman y el Coeficiente de proporcionalidad estiman valores para cielo despejado, en consecuencia podrían ser considerados como un límite superior para la exposición a la radiación solar UV a lo largo del año. Este estudio podría extenderse en un futuro para analizar la contribución de las nubes y los aerosoles,¹⁵ así como la mezcla en altura con la capa límite atmosférica.

V. REFERENCIAS

1. Zittermann A, Iodice S, Pilz S, Grant WB, Bagnardi V, Gandini S. Vitamin D deficiency and mortality risk in the general population: a meta-analysis of prospective cohort studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2011; 95(1):91–100.
2. Afzal S, Bojesen SE, Nordestgaard BG. Reduced 25-hydroxyvitamin D and risk of Alzheimer's disease and vascular dementia. *Alzheimer's & Dementia*. 2013;10(3):296–302.
3. Kravietz A, Kab S, Wald L, Dugravot A, Singh-Manoux A, Moisan F, Elbaz A. Association of UV radiation with Parkinson disease incidence: A nationwide French ecologic study. *Environmental Research*. 2017;154:50 – 56.

4. WHO. Global Solar UV Index: A Practical Guide. *Tech. rep.* 2002.
5. Zhang R, Naughton DP. Vitamin D in health and disease: Current perspectives. *Nutrition Journal*. 2010;9(1).
6. Cabrera S, Lissi E, Honeyman J. *Radiación ultravioleta y salud*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria. 2005.
7. Gilaberte Y, Aguilera J, Carrascosa J, Figueroa F, de Gabriel JR, Nagore E. La vitamina D: evidencias y controversias. *Actas Dermo-Sifiliográficas*. 2011;102(8):572–588.
8. Modenese A, Bisegna F, Borra M, Grandi C, Gugliemetti F, Militello A, Gobba F. Outdoor work and solar radiation exposure: Evaluation method for epidemiological studies. *Medycyna Pracy*. 2016;67(5):577–587.
9. Fitzpatrick TB. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of Dermatology*. 1988;124(6):869–871.
10. CIE. *Nomenclature for UV Doses and Effects on Humans*. 2014.
11. Herman JR. Use of an improved radiation amplification factor to estimate the effect of total ozone changes on action spectrum weighted irradiances and an instrument response function. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115(D23).
12. Madronich S. Intercomparison of NO₂ photodissociation and U.V. Radiometer Measurements. *Atmospheric Environment (1967)*. 1987; 21(3):569–578.
13. Ipiña A, Salum G, Crinó E, Piacentini R. Satellite and ground detection of very dense smoke clouds produced on the islands of the Paraná river delta that affected a large region in Central Argentina. *Advances in Space Research*. 2012; 49(5):966 – 977.
14. Diaz S, Vernet M, Paladini A, Fuenzalida H, Defferrari G, Booth CR, Cabrera S, Casiccia C, Dieguez M, Lovengreen C, Pedroni J, Rosales A, Vrsalovic J. Availability of vitamin D photoconversion weighted UV radiation in southern South America. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2011;10(12):1854.
15. Kim J, Lee YG, Koo JH, Lee H. Relative Contributions of Clouds and Aerosols to Surface Erythral UV and Global Horizontal Irradiance in Korea. *Energies*. 2020;13(6):1504.