

ANÁLISIS DE LA IRRADIANCIA SOLAR EFECTIVA PARA LA SÍNTESIS DE PRE-VITAMINA D₃ EN LA PIEL, EN LA CIUDAD DE ROSARIO, ARGENTINA

ANALYSIS OF THE EFFECTIVE SOLAR IRRADIANCE FOR THE SYNTHESIS OF PRE-VITAMIN D₃ ON THE SKIN, IN ROSARIO, ARGENTINA

Adriana Ipiña^{*1}, Gamaliel López-Padilla², Ana Fisanotti³, Montserrat Dávalos⁴,
and Rubén D. Piacentini¹

¹Instituto de Física Rosario – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – (S2000EKF) Rosario – Argentina.

²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N - Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza (66451) – México.

³Facultad de Ciencias Médicas - Universidad Nacional Rosario - Santa Fe 3100 (S2002KKT) Rosario - Argentina

⁴Investigadora Independiente, Monterrey (64810) - 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 contienen vitamina D₃ de manera natural, siendo la principal fuente de obtención la radiación solar ultravioleta (UV), la cual desencadena el mecanismo de la síntesis de la vitamina D en la parte superficial de la piel. En este estudio se determinó la irradiancia solar UV efectiva para la síntesis 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 radiación UV solar para sintetizar pre-vitamina D₃ mínima y suficiente como para producir enrojecimiento de la piel (debido a la dilatación de los vasos sanguíneos superficiales) denominado eritema, diariamente en el periodo junio 2019 - mayo 2020. Se discute la variación de los TES para alcanzar una dosis mínima para la síntesis de pre-vitamina D₃ y aparición de eritema con una fotoexposición del 25 % de la superficie corporal (la cara, el cuello y los brazos).

Palabras Clave: radiación UV solar, vitamina D, dosis eritémica mínima, 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 ultraviolet solar radiation, which triggers the mechanism of the synthesis of vitamin D on the surface skin. In this study, the effective UV solar irradiance for the synthesis 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 for the synthesis of pre-vitamin D₃ and enough to produce redness of the skin (due to dilation of the superficial blood vessels) also known as 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 and erythema with a photoexposure of 25 % of the body (face, neck and arms).

Keywords: UV solar radiation, vitamin D, minimal erythema dose, exposure times, Argentina.

I. INTRODUCCIÓN

La vitamina D participa en múltiples procesos en el cuerpo humano, en varios otros mamíferos, reptiles y anfibios, interviene en la regulación de la homeostasis del calcio y en el metabolismo óseo. La deficiencia

de esta vitamina es asociada al incremento de algunos cánceres, enfermedades como el Parkinson, Alzheimer, entre otras.¹⁻³ La síntesis de la vitamina D en la piel humana es producida por la radiación solar ultravioleta (UV), siendo esta la principal fuente de obtención, ya que pocos alimentos la contienen de

¹ipina@ifir-conicet.gov.ar

manera natural.⁴ La radiación solar UV que llega a la superficie terrestre varía esencialmente en función de la composición atmosférica (especialmente O₃ estratosférico y troposférico), la ubicación geográfica, la hora del día y los días del año. El rango UV es el más energético por fotón incidente (280-400 nm). Este rango espectral desencadena las reacciones fotoquímicas más importantes en la piel humana al interactuar con el 7-dehidrocolesterol (7-DHC) presente en las membranas plasmáticas de los queratinocitos de la epidermis y en los fibroblastos de la dermis.⁵⁻⁷ Se producen dos tipos de vitamina D a partir de la interacción entre los fotones UV y la piel: la vitamina D₂ (ergocalciferol) sintetizada en los vegetales y la vitamina D₃ (colecalciferol) sintetizada en la piel humana.⁸ Cuando el precursor 7-dehidrocolesterol presente en la piel, interactúa con la radiación UV se convierte en pre-vitamina D₃. Esta última se libera de la membrana celular y se asocia a su proteína transportador en sanguíneo que es la α 1-globulina y viajando por el torrente sanguíneo llega al hígado en 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.^{9,10} Por esta razón es importante conocer los Tiempos de Exposición Solar (TES) para iniciar la síntesis de la vitamina D, sin provocar un daño a la piel (e.g. eritema). Para calcular los TES que producen cada efecto biológico específico, se utiliza la definición de la dosis efectiva:

$$Dosis = \int_{t_1}^{t_2} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} d\lambda dt = \int_{t_1}^{t_2} E_t dt \quad (1)$$

donde E_{λ} es la irradiancia solar espectral a nivel del suelo y S_{λ} es el espectro de acción para la síntesis de la pre-vitamina D₃ o el espectro de acción eritémica. La irradiancia efectiva E_t , representa la irradiancia de pre-vitamina D₃ (E_{vitD}) o la irradiancia eritémica (E_{er}) según sea el caso. La integral de estas irradiancias de un tiempo t_1 a t_2 , definen las dosis en unidades de J/m². La Dosis Eritémica Mínima (MED por sus siglas en inglés) tiene un valor de 250 J/m² en una piel de fototipo II de la clasificación de Fitzpatrick.¹¹ De manera análoga, la Dosis Mínima para generar los niveles adecuados de vitamina D₃ (MDD por sus siglas en inglés) es de 34 J/m² con una exposición de cuerpo completo y de 136 J/m² con una exposición del 25 % del cuerpo (brazos, cuello y cara).^{12,13} Adicionalmente, la MDD se puede aproximar en términos de $\frac{1}{4}$ MED (63 J/m²) para una piel de fototipo II.¹⁴ En este trabajo se presenta la estimación de la E_{vitD} , mediante tres métodos: Coeficiente de proporcionalidad,¹² Ecuación de Herman¹⁵ y Modelo TUV.¹⁶ En particular, se utiliza el modelo TUV en la determinación de los TES (t_2-t_1) para acumular 1MED, $\frac{1}{4}$ MED y 1MDD en la ciudad de Rosario, Argentina.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de la columna total de ozono (O₃) provienen de la Colección 3, OMTD3 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, disponible en disc.gsfc.nasa.gov. Para las mediciones *in situ* de E_{λ} se utilizó un espectroradiómetro Optronic-OL756 con esfera integradora y para el índice UV, la estación meteorológica Davis. Ambos instrumentos se encuentran ubicados en el Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR), en la ciudad de Rosario.

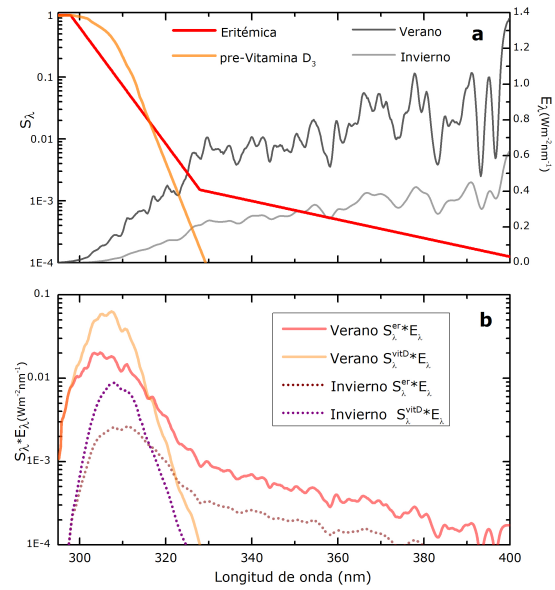


Figura 1: a) Espectros de acción de pre-vitamina D₃ y eritémica, e irradiancia espectral solar medida en cielo despejado, cerca de los solsticios de verano (28/Dic/2011) e invierno (23/Jun/2011), en la ciudad de Rosario. b) Irradiancia ponderada por cada espectro de acción y estación del año.

III. Coeficiente de proporcionalidad

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) y la World Meteorological Organization (WMO) han reportado la siguiente relación:

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

donde k tiene dos valores distintos en verano e invierno para una ciudad del hemisferio sur.¹² En este trabajo, los valores de k fueron obtenidos calculando E_{er} y E_{vitD} por medio de la Ec. 1 y las mediciones de E_{λ} realizadas bajo cielo despejado en verano e invierno (Figura 1). Posteriormente, la sustitución de E_{er} y E_{vitD} en la Ec. 2 determina $k=1.6$ en invierno y de $k=2$ en verano. Finalmente los valores diarios de E_{vitD} para ambas épocas del año son estimados

Tabla 1: Coeficientes¹⁵ para obtener $U(\theta)$; $RAF(\theta) = \frac{a+c\theta^2+e\theta^4}{1+b\theta^2+d\theta^4+f\theta^6}$

	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

a partir de la E_{er} . Esta irradiancia eritemica se deriva del índice UV medido al mediodía solar en cielo despejado por la estación Davis. El índice UV es internacionalmente reconocido en una escala de 0 a 20 (o más) y resulta de multiplicar E_{er} por 40 m²/W.

IV. Ecuación de Herman

Herman¹⁵ estableció una ecuación general de E_{vitD} para cualquier punto geográfico:

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

donde el O_3 es la columna total de ozono, RAF es el Factor de Amplificación de Radiación y U es una función de ajuste, estos dos últimos dependientes del ángulo cenital solar (θ). La E_{vitD} en esta ecuación depende del valor de O_3 en el sitio en cuestión y las funciones de RAF y U de acuerdo al ángulo cenital (relacionado a la hora del día). Los coeficientes para obtener U y RAF se muestran en la Tabla 1, los cuales fueron obtenidos ejecutando el modelo TUV.

V. Modelo TUV

El modelo Tropospheric Ultraviolet Radiation (TUV) REFERENCIA DE MADRONICH emplea la ecuación de transferencia radiativa para obtener la E_λ a nivel del suelo, en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. El modelo incorpora el perfil de aerosoles cuya profundidad óptica (AOD) es de 0.34 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 del lugar (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar), AOD a 550 nm, 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 del instrumento OMI. Cabe destacar que la medición satelital de la columna total de O_3 podría estar subestimada en ciudades muy contaminadas (e.g. Santiago de Chile) y tener diferencias significativas con respecto a las mediciones terrestres.

Con el modelo TUV también se calcularon los valores de E_{vitD} y E_{er} para las coordenadas de la ciudad de Rosario (32.95°S, 60.62°W, 25 m snm). Las estimaciones se realizaron diariamente al mediodía solar local (entre las 12:00 - 13:00 h), en el periodo junio 2019 - mayo 2020.

VI. Cálculo de los TES

Los valores de E_{vitD} y E_{er} derivados del modelo TUV fueron utilizados como base para calcular los TES. La Ec. 1 fue resuelta sistemáticamente por un código en python comenzando a la hora de máxima intensidad solar (t_1) y terminando (t_2) al alcanzar: 1MED, $\frac{1}{4}$ MED y 1MDD. Este proceso se repitió día a día, revelando el intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$) para generar las dosis a lo largo de todo el periodo.

VII. RESULTADOS

La irradiancia pre-vitamina D₃ calculada al mediodía solar empleando los tres métodos se muestra en la Fig. 2. Como puede observarse, existe una alta similitud entre los resultados obtenidos con la Ec. de Herman y con el modelo TUV. La diferencia relativa promedio fue de 3.6 % en verano y de 0.4 % 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: 8.5 % y 8.4 % en invierno, así como de 20.8 % y 17.1 % en verano, respectivamente.

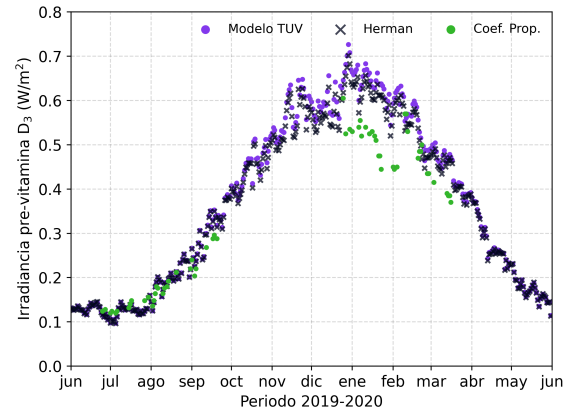


Figura 2: Irradiancia de pre-vitamina D₃ para la ciudad de Rosario, obtenida con: Coeficiente de proporcionalidad, Ec. de Herman y Modelo TUV.

Un estudio¹⁷ sobre el porcentaje de conversión de 7-DHC a pre-vitamina D₃ en diferentes latitudes y épocas del año, reveló que a latitudes mayores 40°[S-N] en invierno, esta conversión es extremadamente ineficiente. La magnitud de este porcentaje es inversamente proporcional a la latitud en ciudades del continente americano. En el hemisferio norte, las ciudades

Tabla 2: TES obtenidos por Cabrera 2005, Diaz et al. 2011 (celdas grises) y análisis presente con modelo TUV (celdas con fondo blanco): tasa de dosis (W/m^2), fototipo y para $\frac{1}{4}$ MED, 1MED y 1MDD consideradas por cada autor (x: dosis no alcanzada).

Ciudad	Cabrera 2005 fototipo III 1MED (210 J/m ²)				Diaz et al. 2011 fototipo II 1MED (250 J/m ²)		Presente fototipo II					
	Tasa de dosis W/m ²						1MED (250 J/m ²)		$\frac{1}{4}$ MED (63 J/m ²)		1MDD (136 J/m ²)	
	TES (minutos)											
	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno
Santiago de Chile	0.36	0.06	10	56	21	119	15	53	4	14	4	16
Rosario	0.29	0.1	-	-	-	-	14	55	4	14	4	16
Punta Arenas	0.13	0.03	26	134	37	x	23	x	5	102	7	x

de Boston y Edmonton tuvieron su máximo porcentaje de conversión a pre-vitamina D₃ el mes de junio, mientras que en el hemisferio sur, Buenos Aires y Ushuaia lo tienen el mes de diciembre. Estos resultados son semejantes a los obtenidos con los tres métodos de derivación de la E_{vitD} en Rosario, ya que el máximo valor ocurre en diciembre (Figura 2).

Para una exposición a partir del mediodía solar, en el periodo junio 2019 - mayo 2020 se estimaron los TES hasta alcanzar las diferentes dosis (Fig. 3). En invierno los TES para alcanzar 1MDD, se encuentran en promedio a los 14 ± 5 minutos, para acumular $\frac{1}{4}$ MED tiene un valor de 11 ± 3 minutos y para la aparición de eritema (1MED) a los 47 ± 15 minutos. En verano, en promedio se requieren 4 ± 1 minutos para alcanzar la dosis mínima de pre-vitamina D₃, 4 ± 1 minutos para $\frac{1}{4}$ MED y 15 ± 2 minutos para la eritemática. Comparando los TES para obtener 1MDD y $\frac{1}{4}$ MED, se observa que tienen valores semejantes para las temporadas de invierno y verano con una diferencia promedio de 1 minuto.

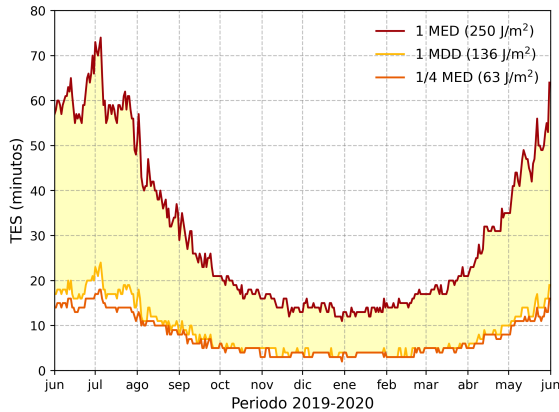


Figura 3: TES diarios para acumular $\frac{1}{4}$ MED, 1MED y 1MDD en una persona de un fototipo de piel II comenzando la exposición a partir del mediodía solar.

VIII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo TUV y la Ec. de Herman mostraron valores semejantes de E_{vitD} 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 importan-

te contribución en la atenuación del UV entre mayo-agosto cuando suelen tener lugar incendios en el delta del río Paraná frente a Rosario.¹⁸ Respecto al método basado en el Coeficiente de proporcionalidad, aunque su aplicación es práctica, la precisión depende del factor k de cada época del año. En verano, subestima levemente la magnitud de la E_{vitD} con respecto a los otros dos métodos.

Diaz et al. 2011 calculó los TES para 1MDD y 1MED en fototipo II, en una exposición del 9% del cuerpo (sólo la cabeza). Los TES para la síntesis de vitamina D₃ en Buenos Aires (a 300 km al Sur-Este de Rosario) y Santiago de Chile, fueron de 7 y 4 minutos en verano, respectivamente.¹⁸ Estos TES para alcanzar 1MDD difieren más del doble respecto a la estimación hecha para la ciudad de Rosario (4 ± 1 min). A pesar de que estas ciudades se encuentran a latitudes cercanas, en los primeros dos casos, además de ser ciudades mas contaminadas, los TES son más largos debido a que las mediciones no discriminan las condiciones de cielo y consideran un área fotoexpuesta del cuerpo de menor tamaño.

Un análisis comparativo de los TES para acumular 1MED a diferentes latitudes, fue utilizando para dos ciudades incluidas en dos estudios distintos.^{19,20} En la Tabla 2 se muestra para la ciudad de Santiago y de Punta Arenas, las tasas de dosis medidas y los TES de acuerdo a los fototipos y dosis consideradas. Los valores para la ciudad de Rosario corresponden a los valores estimados para este trabajo con el Modelo TUV, incorporando la aproximación también para las otras ciudades.

Los valores para Santiago de Chile fueron estimados con el modelo TUV, se encuentran entre los otros dos TES de referencia. Las diferencias se pueden atribuir a la nubosidad, hora del día y número de mediciones, así como diferencias entre los parámetros de entrada introducidos en el modelo (como el ozono y los aerosoles troposféricos). Para Punta Arenas, los TES en los tres estudios muestran concordancia en verano sin embargo, en invierno la dosis no es alcanzada con los resultados de E_{er} del modelo TUV al igual que lo reportó Diaz et al. 2011. Para alcanzar 1MED en Rosario se necesita en promedio TES de 15 ± 2 min en verano, los cuales se encuentran en el rango esperado de acuerdo a la latitud.

Por otro lado los valores calculados para 1MDD y $\frac{1}{4}$ MED indican que los TES para acumular 1MDD pueden ser derivados a partir del MED con una dife-

rencia promedio de 3 minutos en invierno y 0.5 minutos en verano.

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 troposféricos,²¹ así como la mezcla en altura con la capa límite atmosférica.

IX. 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. Biesalski HK, Köhrle J, Schümann K, eds. *Vitamine, Spurenelemente und Mineralstoffe*. Georg Thieme Verlag. 2002.
5. WHO. Global Solar UV Index: A Practical Guide. *Tech. rep.* 2002.
6. Brunser, O. Radiación ultravioleta y vitamina D. chap. 11 Radiación ultravioleta y Salud, p. 295 pp. Ed. Universitaria Ed. Cabrera, S. Lissi, E. y Honeyman, J. 2005;.
7. Olds WJ, McKinley AR, Moore MR, Kimlin MG. In vitro model of vitamin D₃ (Cholecalciferol) synthesis by UV radiation: Dose–response relationships. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2008;93(2):88–93.
8. Zhang R, Naughton DP. Vitamin D in health and disease: Current perspectives. *Nutrition Journal*. 2010;9(1).
9. 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.
10. 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.
11. Fitzpatrick TB. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of Dermatology*. 1988;124(6):869–871.
12. CIE 209:2014. *Nomenclature for UV Doses and Effects on Humans*. 2014.
13. Fioletov V, McArthur L, Mathews T, Marrett L. Estimated ultraviolet exposure levels for a sufficient vitamin D status in North America. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2010;100(2):57–66.
14. Dowdy JC, Sayre RM, Holick MF. Holick's rule and vitamin D from sunlight. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*. 2010; 121(1-2):328–330.
15. 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).
16. Madronich S. Intercomparison of NO₂ photodissociation and U.V. Radiometer Measurements. *Atmospheric Environment (1967)*. 1987; 21(3):569–578.
17. Lu Z, Chen T, Holick M. *Influence of Season and Time of Day on the Synthesis of Vitamin D₃*, pp. 53–56. De Gruyter. 2019;.
18. 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.
19. Diaz S, Vernet M, Paladini A, Fuenzalida H, De-ferrari G, Booth CR, Cabrera S, Casiccia C, Die-guez M, Lovengreen C, Pedroni J, Rosales A, Vrsalovic J. Availability of vitamin D photocon-version weighted UV radiation in southern South America. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2011;10(12):1854.
20. Cabrera, S. Radiación ultravioleta y vitamina D. chap. 7 Radiación ultravioleta y Salud, p. 88 pp. Ed. Universitaria Ed. Cabrera, S. Lissi, E. y Honeyman, J. 2005;.
21. Kim J, Lee YG, Koo JH, Lee H. Relative Contributions of Clouds and Aerosols to Surface Erythemal UV and Global Horizontal Irradiance in Korea. *Energies*. 2020;13(6):1504.