

IRRADIANCIA SOLAR ESPECTRAL EN CIUDADES DE VENEZUELA Y ECUADOR

Bruna Asunción Regalado Díaz – bregalado@yachaytech.edu.ec
Lenin Andrés Guerrero León – lenin.guerrero@yachaytech.edu.ec
Dolores Lastenia Parra Quisahuano– lola_parra_31dic@hotmail.com
Graciela Marisa Salum – gsalum@yachaytech.edu.ec
Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YACHAY

Resumen. *El propósito de este estudio fue analizar parámetros relacionados con la degradación de polímeros expuestos a la intemperie tales como la irradiancia solar espectral, la temperatura, la humedad relativa y la contaminación para las ciudades de Urcuquí (Ecuador), Valencia (Venezuela) y Maracaibo (Venezuela) en 2014. Para llevar a cabo este estudio se emplearon datos satelitales mensuales tales como temperatura ambiente, humedad relativa, dióxido de carbono y aerosoles entre otros, obtenidos de bases de datos satelitales (SSE NASA, Giovanni NASA) y del Observatorio de Mauna Loa. Se encontró que la ciudad de Urcuquí posee la mayor irradiancia solar en todos los rangos de longitud de onda, mientras que la ciudad de Maracaibo es la que posee la mayor temperatura pero posee menor irradiancia solar. En cuanto al contenido de material particulado (aerosoles) son las ciudades de Maracaibo y Valencia las que poseen valores superiores, con una marcada diferencia entre el mes de abril y el resto del año. Con los anteriores parámetros puede analizarse la atmósfera para considerar la degradación de materiales a la exposición solar. Por lo tanto, sería conveniente elaborar un modelo que permita vincular dichos parámetros y la degradación de los polímeros artificiales, así como también el efecto que tienen estos sobre la piel que se expone directamente al sol.*

Palabras clave: *Irradiancia solar espectral, Degradación, Temperatura ambiente, Humedad relativa, AOD*

1. INTRODUCCIÓN

Es ampliamente estudiado el efecto de la radiación solar no solo en el dimensionamiento de equipos expuestos a la intemperie sino también en la selección de materiales que serán sometidos a esta (Burger y Rütther 2006), especialmente el efecto de la radiación ultravioleta, sobre los materiales poliméricos naturales (almidón, proteínas, caucho natural, celulosas, ácidos nucleicos, etc.) o artificiales (caucho sintético, PE, PVC, Nylon, resinas epoxi, fenólicos, poliésteres insaturados, silicona, cianocrilato, poliuretano, etc.). Por ejemplo, en la zona de Urcuquí e Ibarra (Ecuador) se utilizan polímeros (polimetacrilato de metilo, policarbonato, policloruro de vinilo, etc.) para construir invernaderos, los cuales se degradan debido a su exposición perenne a la radiación solar.

Tomiiita (2002) creó un software que simulaba la degradación del PBT (Tereftalato de polibutileno) en diferentes lugares de Japón, encontrando un menor tiempo de vida del material cuanto más al sur se encontrara la muestra, lo que implicaba un cambio en condiciones meteorológicas. El resultado de la modelización resultó en una acción sinérgica entre radiación solar UV, temperatura y humedad a la hora de la degradación. Por lo tanto, es necesario conocer las características de la atmósfera y la radiación solar de la región donde se utilizan polímeros. Para extender este análisis y conocer de manera más precisa la radiación solar, en este trabajo se analizará la irradiancia espectral solar de las ciudades de Urcuquí (Ecuador), Maracaibo (Venezuela) y Valencia (Venezuela).

Muchos polímeros son susceptibles a la interacción con ciertos agentes naturales y artificiales. Para determinar el rango de longitudes de onda que debe tenerse en cuenta en el análisis de la degradación de materiales se consideraron varios estudios. Por ejemplo, Marin et al. (2013) estudiaron películas delgadas de polímeros de tipo PCPDTBT considerando la evolución de las propiedades ópticas al estrés térmico. Para ello se analizó un espectro de absorción de radiación de 350 a 1200 nm, ya que los dos picos de absorción de este polímero están uno alrededor de los 400 a 450 nm y otro alrededor de 750 a 800 nm. Por otro lado Prakash et al. (2014) consideraron el rango de 200 a 800 nm a la hora de analizar el óxido de zinc dado que este posee un pico de absorción alrededor de los 375 nm. Otros trabajos de investigación como los de Malwala y Gopinath (2015) y Carling et al. (2014) consideran rangos de 200 a 70 nm y 300 a 600 nm, respectivamente. Kawashima et al. (2015) analizaron el espectro de absorbancia de celdas solares en el rango de 350 a 950 nm. Debido a los trabajos anteriores, en este estudio se considera el rango de longitudes de onda de 280 a 1200 nm.

A la hora de valorar la posible degradación de materiales expuestos a la intemperie es importante considerar parámetros meteorológicos, tales como la temperatura ambiente, la humedad relativa y la cantidad de contaminantes presentes en la atmósfera, exacerbando (acelerando) el proceso de deterioro que produce la exposición continua a la radiación ultravioleta, visible e infrarroja solar (Duffie y Beckman 2013). En este trabajo se presentarán los valores de estas variables para tres ciudades.

2. RESULTADOS

Se analizaron tres ciudades de diferente latitud y longitud. La ciudad de Urcuquí se encuentra ubicada en la provincia de Imbabura y está ubicada a una latitud de $0,433^{\circ}$ N y una longitud de $78,2^{\circ}$ O. La ciudad de Valencia se encuentra ubicada a una latitud de $10,16^{\circ}$ N, una longitud de $68,01^{\circ}$ O y a 281 m s.n.m. en Venezuela, mientras que la ciudad de Maracaibo se encuentra ubicada a una latitud de $10,63^{\circ}$ N, una longitud de $71,64^{\circ}$ O y a 279 m s.n.m. en el mismo país (ver Fig. 1).

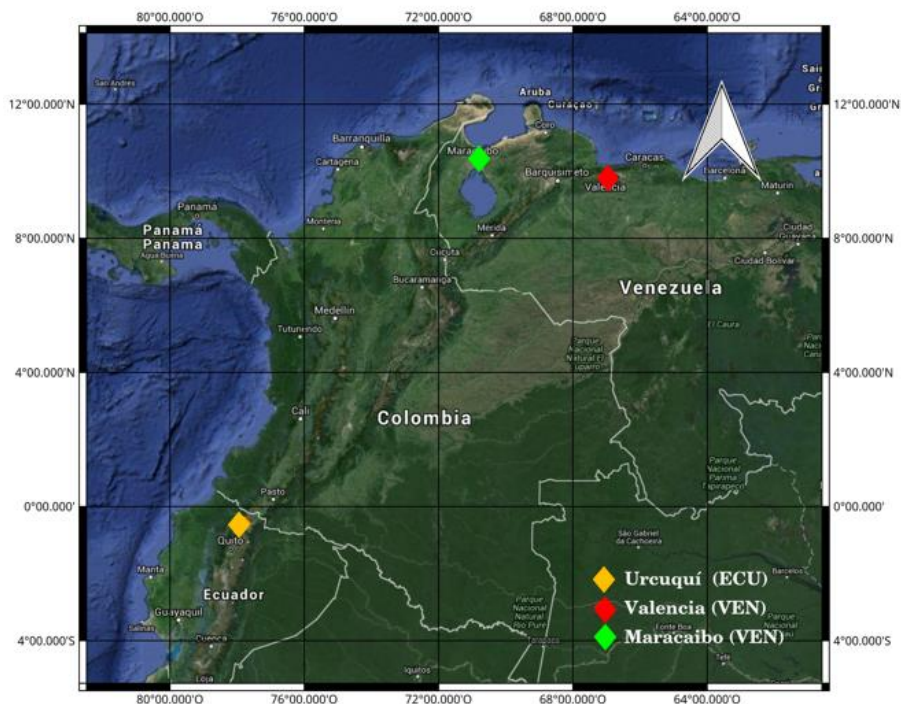


Figura 1. Mapa adaptado del Google Earth mostrando las ubicaciones de las ciudades analizadas.

Se obtuvieron los datos meteorológicos y solares para cada ciudad analizada para poder determinar las condiciones de envejecimiento de los materiales poliméricos expuestos a la intemperie. Los parámetros seleccionados para este análisis son: temperatura ambiente, humedad relativa, aerosoles (más precisamente la profundidad óptica de los aerosoles en 550 nm o AOD_{550nm}) y la irradiancia solar global espectral en los rangos: UV (400 a 280 nm), visible (700 a 400 nm) e infrarrojo (1200-700).

La irradiancia solar espectral se calculó con el modelo SMARTS (Gueymard, 1995) para cada mes del año 2014 utilizando datos satelitales de:

- SSE/NASA, de donde se extrajeron los datos de temperatura ambiente, humedad relativa, columna de agua precipitable y albedo superficial. Esta base de datos utiliza datos de más de 200 satélites y promedia 22 años;
- Sea WiFF MODIS-Terra de donde obtuvieron los datos de AOD_{550nm} . En este caso se trata de datos mensuales promedio para cada año seleccionado, de la base de datos de Giovanni/NASA,
- OMI/NASA, para el caso de la columna total de ozono de la base de datos de Giovanni/NASA, también.

El dato de dióxido de carbono promedio mensual global fue extraído de la base de datos de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) del Observatorio ubicado en Mauna Loa, Hawaii, ya que estos datos se consideran representativos de la concentración global de este gas a nivel mundial. Estos datos pueden obtenerse de la página web: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>.

2.1 Datos meteorológicos

En la Fig. 2 se muestra la evolución media mensual para el año 2014 de los parámetros de: temperatura ambiente a 10 m de la superficie terrestre, humedad relativa y AOD_{550nm} para las tres ciudades analizadas. Como puede verse la ciudad de Maracaibo posee mayor temperatura ambiente que las demás ciudades durante todo el año. Es de señalar que si bien las ciudades de Maracaibo y Valencia poseen su máximo alrededor del mes marzo, abril respectivamente, la ciudad de Urcuquí posee su máximo alrededor del mes de septiembre. En cuanto a la humedad relativa puede verse que no existe una ciudad con mayores valores durante todo el año sino que Valencia supera a Maracaibo en todo el año.

En la Tab. 1 se muestran los valores medios anuales junto con la desviación estándar de la temperatura ambiente, la humedad relativa y el AOD_{550nm} para las tres ciudades.

Se compararon los valores medios anuales de la temperatura ambiente entre Maracaibo y Urcuquí y se encontró una diferencia de 4,65°C. En el caso de la humedad relativa se comparó Valencia con Urcuquí y se encontró una diferencia de 11,06%.

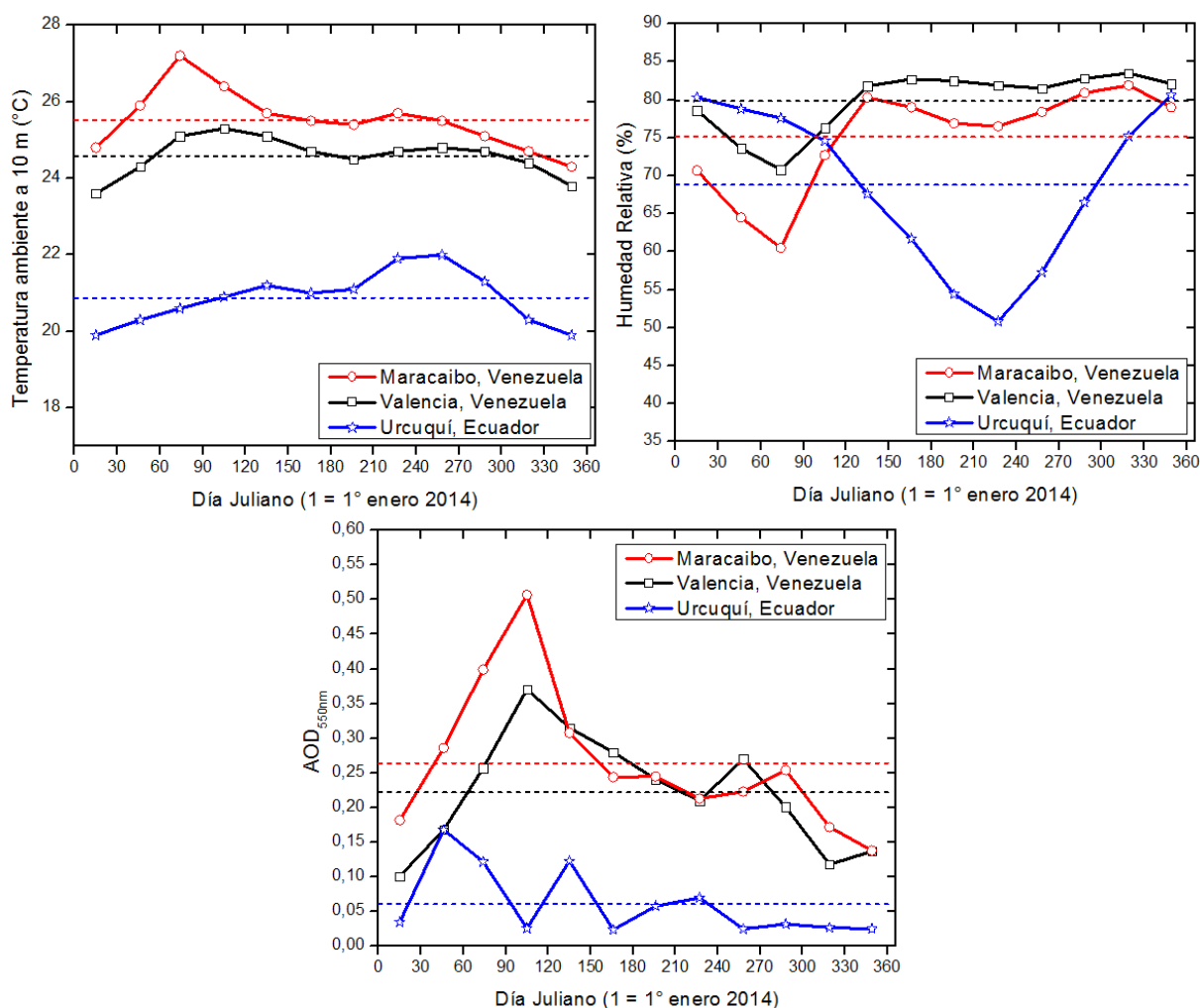


Figura 2. Evolución anual de valores medios mensuales para las tres ciudades analizadas. Arriba e izquierda: Temperatura ambiente a 10 m de la superficie terrestre. Arriba y derecha: Humedad relativa media. Abajo: AOD_{550nm}. Maracaibo (línea roja) y Valencia (línea negra) de Venezuela. Urcuquí (línea azul) de Ecuador. En líneas de puntos se presentan los datos medio anual para cada ciudad, presentados en la Tab. 1.

El espesor óptico de aerosol (AOD, por sus siglas en inglés, *aerosol optical depth*) es el grado en que los aerosoles extinguen la transmisión de la radiación a cierta longitud de onda, por absorción o dispersión de la misma.

En cuanto al parámetro relacionado con la concentración de contaminantes atmosféricos puede verse que Urcuquí tiene un valor medio bajo: AOD_{550nm} = (0,061±0,050), mientras que Valencia y Maracaibo poseen valores medios superiores a Urcuquí: AOD_{550nm, VALENCIA} = 3,6 y AOD_{550nm, MARACAIBO} = 4,3.

Tabla 1 – Valores medios anuales y desvío estándar de: temperatura ambiente, humedad relativa y AOD_{550nm} para las ciudades analizadas.

	Temperatura ambiente anual (°C)		Humedad relativa anual (%)		AOD _{550nm}	
	Media	Desvío estándar	Media	Desvío estándar	Media	Desvío estándar
Valencia	24,58	0,51	79,84	4,14	0,222	0,082
Maracaibo	25,52	0,78	75,11	6,80	0,264	0,102
Urcuquí	20,87	0,69	68,78	10,64	0,061	0,050

2.2 Datos de irradiancia solar espectral

Para poder realizar la modelización con el algoritmo SMARTS se requieren parámetros de entrada, que fueron principalmente obtenidos desde las bases de datos satelitales explicadas en la introducción. En la Fig. 3 (Izquierda) se muestran las irradiancias solares espectrales obtenidas con el algoritmo SMARTS para las tres ciudades analizadas en el rango 280 a 1200 nm. Cualitativamente puede verse que las irradiancias espectrales tienen un orden creciente en Valencia, Maracaibo (ambas de Venezuela) y Urcuquí (Ecuador).

En base a las investigaciones citadas en la Introducción de este trabajo, se optó por seleccionar el rango de 280 a 1200 nm para el análisis de las irradiancias en cada rango, que se muestran en la Fig. 3 (Derecha).

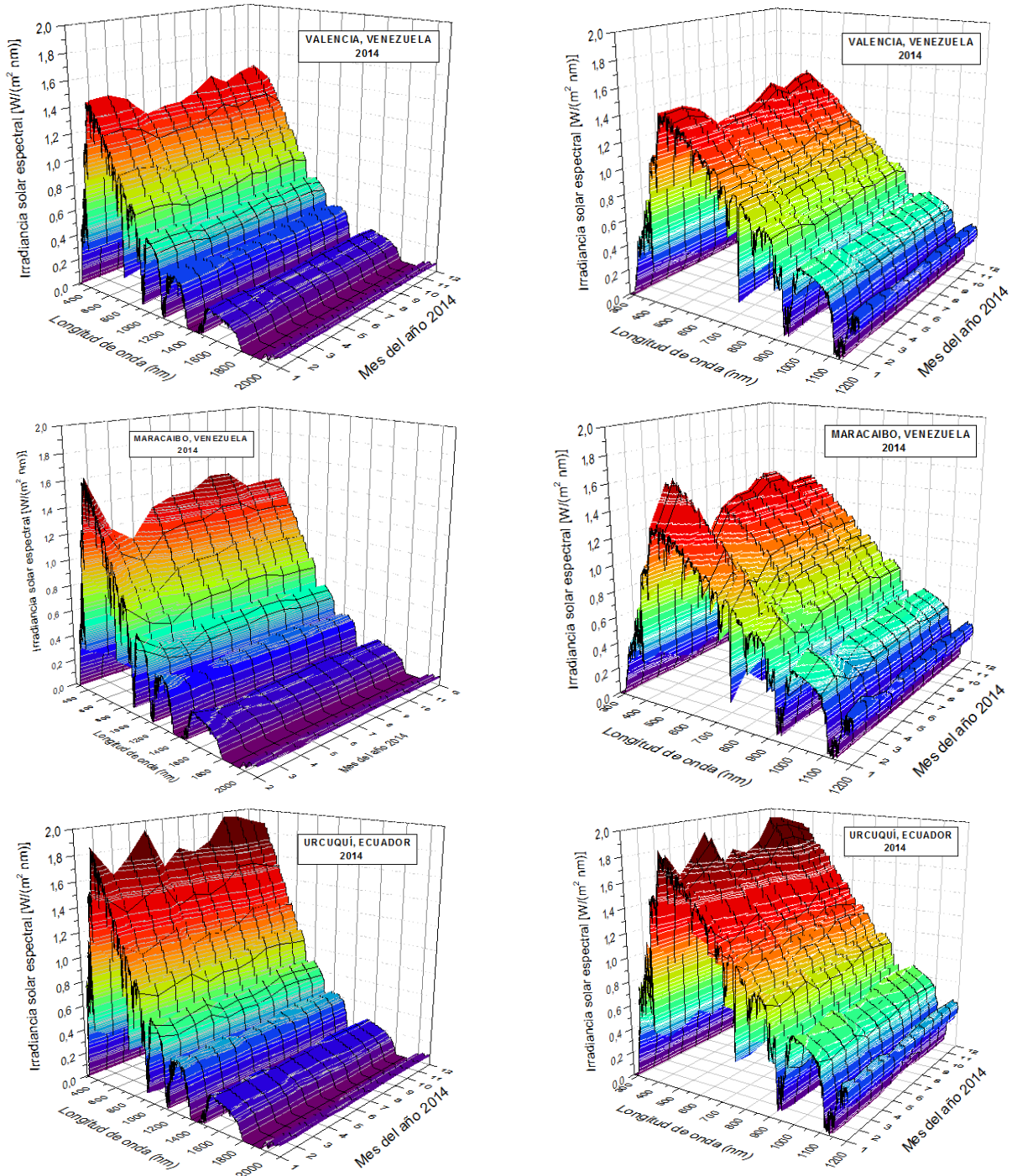


Figura 3 – Izquierda: Irradiancia solar espectral modelizada para cada mes del año 2014, en el rango 280 a 1200 nm. Derecha: Irradiancia solar espectral modelizada para cada mes del año 2014, en el rango 280 a 2000 nm. Arriba: Valencia, Venezuela. Medio: Maracaibo, Venezuela. Abajo: Urcuquí, Ecuador.

Con las irradiancias solares espectrales (en $W/(m^2 \text{ nm})$) calculadas para cada sitio y para cada mes del año 2014, se seleccionaron el mes con mayor irradiancia y el mes con menor irradiancia. Posteriormente, se dividió a las irradiancias

espectrales en distintos rangos de longitud de onda (UV: 280-400 nm, visible: 400-700 nm e infrarroja: 700-2000 nm) y se calculó la integral en longitud de onda para obtener las irradiancias solares (en W/m^2). El resumen de los resultados se muestra en la Tab. 2.

Tabla 2 – Irradiancias solares (W/m^2) en diferentes rangos de longitudes de onda (UV: 280-400 nm, visible: 400-700 nm e infrarroja: 700-2000 nm).

	<i>Irradiancia solar (W/m^2)</i>					
	<i>URCUQUI</i>		<i>VALENCIA</i>		<i>MARACAIBO</i>	
	Septiembre	Febrero	Febrero	Mayo	Enero	Abril
280-2000 nm	1032,65	851,22	783,09	679,84	717,87	591,49
280-400 nm	71,94	44,65	41,48	21,70	37,17	19,97
400-700 nm	484,13	411,58	374,11	328,04	342,50	283,15
700-1200 nm	347,93	288,97	272,67	244,80	250,80	213,91
1200-2000 nm	128,65	106,02	94,83	85,30	87,40	74,46
700-2000 nm	476,58	394,99	367,50	330,10	338,20	288,37

Como se puede ver en Tab. 2 y la Fig. 4, de los cálculos resultó que la ciudad de Urcuquí es la ciudad con mayor irradiancia solar en todos los rangos analizados.

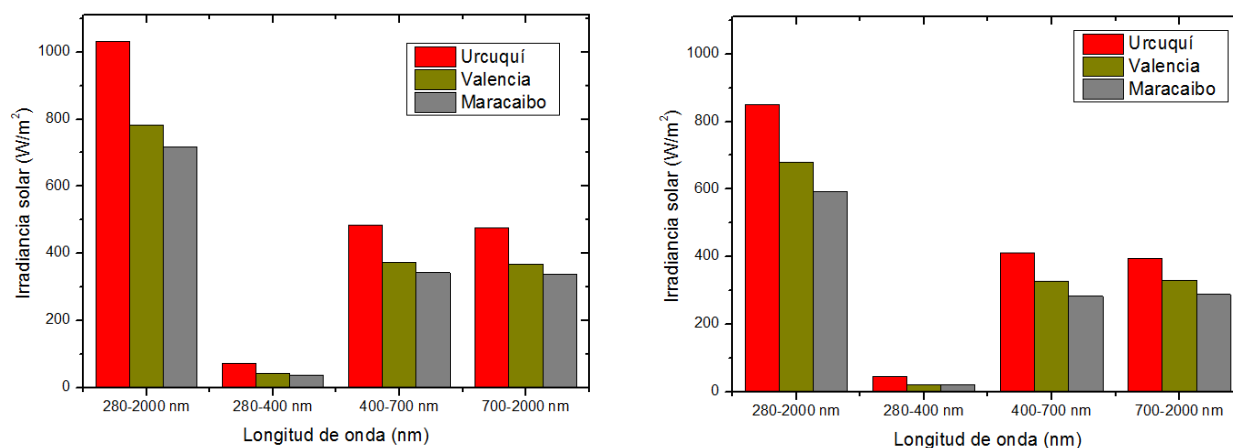


Figura 4 – Valores de irradiancia solar para cada ciudad en los diferentes rangos de longitud de onda. Izquierda: Valores máximos. Derecha: Valores mínimos.

Para los valores extremos máximos, los meses encontrados fueron: Septiembre para Urcuquí, Febrero para Valencia y Enero para Maracaibo. Para los valores extremos mínimos, los meses fueron: Febrero para Urcuquí, Mayo para Valencia y Abril para Maracaibo.

3. CONCLUSIONES

Se obtuvieron los valores meteorológicos medios de las ciudades analizadas desde base de datos satelitales. Posteriormente se utilizó el algoritmo SMARTS para calcular las irradiancias solares espectrales y posteriormente analizar su integral en diferentes rangos.

De los resultados obtenidos se encontró que la ciudad de Urcuquí posee la mayor irradiancia solar en todos los rangos de longitud de onda, mientras que la ciudad de Maracaibo es lo que posee la mayor temperatura pero posee menor irradiancia solar. En cuanto al contenido de aerosoles son las ciudades de Maracaibo y Valencia las que poseen valores superiores, con una marcada diferencia entre el mes de abril y el resto del año.

El siguiente paso a la presente investigación sería elaborar un modelo que vincule la irradiancia solar (en uno de sus rangos o en todos), la temperatura ambiente, la contaminación presente en el lugar y humedad relativa, con la degradación de polímeros artificiales. Adicionalmente, se podría extender este estudio al efecto de los factores antes mencionados sobre la piel expuesta al sol.

REFERENCIAS

- Burger, B., Rütther, R., 2006. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature, *Solar Energy*, vol. 80, n. 1, pp. 32-45.
- Carling, C.J., Viger, M.L., Nguyen Huub, V.A., Garcia, A.V., and Almutairi, A., 2014. In Vivo Visible Light-Triggered Drug Release From an Implanted Depot. *Chem. Sci.*, 00, 1-7
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons. Fourth Edition.
- Gueymard, C.A., 1995. SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. Technical Report No. FSEC-PF-270-95. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
- Kawashima, K., Tamai, Y., Ohkita, H., Osaka, I. and Takimiya, K., 2015. High-efficiency polymer solar cells with small photon energy loss. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms10085
- Malwala D. and Gopinath P., 2015. Fabrication and characterization of poly(ethylene oxide) templated nickel oxide nanofibers for dye degradation. *Environmental Science: Nano*, Issue 1. DOI: 10.1039/c4en00107a
- Marin, L., Penxten, H., Van Mierloo, S., Carleer, R., Lutsen, L., Vanderzande, D., Maes, W., 2013. In Situ Monitoring the Thermal Degradation of PCPDTBT Low Band Gap Polymers with Varying Alkyl Side-Chain Patterns. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 00, 000–000
- Prakash, A., and Bahadur, D., 2014. Chemically Derived Defects in Zinc Oxide Nanocrystals and their Enhanced Photo-Electrocatalytic Activities. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, 21429-21437
- Tomiita, T. Deterioration Simulation Based on Advanced Arrhenius' Model Combined with Environmental Degradation Factors, *Proceedings of 4th International Symposium on Weatherability (4ISW)*, Material Life Society, Japan, Sep., 2000

SOLAR SPECTRAL IRRADIANCE IN CITIES OF VENEZUELA AND ECUADOR

Abstract. *The purpose of this study was to analyze parameters related to the degradation of polymers exposed to weather such as spectral solar irradiance, temperature, relative humidity and pollution for the cities of Urcuquí (Ecuador), Valencia (Venezuela) and Maracaibo (Venezuela) in 2014. To carry out this study used satellite data monthly such as ambient temperature, relative humidity, carbon dioxide and aerosols among others, obtained from databases (NASA SSE, Giovanni NASA) satellite and Observatory of Mauna Loa. We found that the city of Urcuquí has increased solar irradiance in all wavelength ranges, while the city of Maracaibo is the one with the highest temperature, but has lower solar irradiance. In terms of the content of particulate matter (aerosols) are the cities of Maracaibo and Valencia which have higher values, with a marked difference between April and the rest of the year. With the previous parameters you can analyze the atmosphere to consider the degradation of materials to sun exposure. Therefore, it would be convenient to develop a model that allows to link these parameters and the degradation of artificial polymers, as well as also the effect that have these on the skin that is exposed directly to the Sun.*

Keywords: *spectral solar irradiance, degradation, air temperature, relative humidity, AOD*