

Análisis de la Radiación Solar en Tres Ciudades de Coahuila y Durango

S. Orozco^{1,*}, M. Rivero²

Resumen— La energía proveniente del Sol es la principal fuente de energía en procesos físicos, biológicos y químicos, que son vitales para la vida del Planeta. Además es una fuente inagotable de energía que puede ser transformada en energía térmica (calor) y eléctrica (celdas fotovoltaicas y concentración solar). Dada su importancia es necesario medir y/o estimar la cantidad de energía solar que llega a cada punto de la superficie terrestre. En este trabajo se utiliza un método para la determinación de la radiación solar directa en las ciudades de Torreón, Saltillo y Durango, a partir de información disponible de radiación solar global en las Estaciones Sinópticas Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. De acuerdo con los resultados obtenidos, Saltillo tiene el mayor número de horas al día con nublados, mientras que Durango y Torreón presentan el mayor número de horas al día con asoleamiento. Una dependencia de la radiación solar directa con el índice de claridad fue desarrollada, donde la curva muestra un comportamiento similar para Durango, Saltillo y Torreón.

Palabras claves—Índice de Claridad, Radiación solar difusa, Radiación Solar directa.

Abstract—Energy from the Sun is the main source of energy in physical, biological and chemical processes that are vital to the life of the Planet. It is also an inexhaustible source of energy that can be transformed into thermal (heat) and electrical energy (photovoltaic cells and solar concentration). Given its importance, it is necessary to measure and / or estimate the amount of solar energy that reaches each point of the earth's surface. This work uses a method to determine the direct solar radiation in the cities of Torreón, Saltillo and Durango, from available information of global solar radiation in Synoptic Meteorological Stations of the National Weather Service. According to the results obtained, Saltillo has the highest number of hours per day with overcast condition, while Durango and Torreón present the highest number of hours per day with sunny condition. A dependence of the direct solar radiation with the clarity index was developed, where the curve shows a similar behavior for Durango, Saltillo and Torreón.

Keywords— Clearness Index, Diffuse Solar radiation, Direct solar radiation.

XII. INTRODUCCIÓN

El Sol es la principal fuente de energía para todas las formas de vida que se conocen en la Tierra. Además, la energía del Sol es crucial en procesos biológicos, climáticos, ambientales e hidrológicos, y en la industria solar [1] [2]. En los últimos años, la industria solar ha experimentado un alto crecimiento, debido a incremento en costos de los combustibles fósiles, disminución de las reservas fósiles totales, problemas de contaminación y a las estrategias y programas que México ha impulsado, relacionadas a la transición de un camino sustentable, diversificación de la matriz energética y seguridad energética del país [2], [3].

Las tecnologías solares, tanto fotovoltaicas como térmicas, crecen a tasas aceleradas en el mundo. Sin embargo, el éxito del diseño y la utilización eficaz de las tecnologías solares para aplicaciones tales como: suministro de energía y agua para usos industriales, agrícolas y domésticos, dependen en gran medida de la disponibilidad de información sobre la radiación solar característica de la ubicación [4]. Por ello, es de vital importancia medir y/o estimar la cantidad de energía solar que llega a cada punto de la superficie terrestre.

México, por su ubicación geográfica (Hemisferio Norte, entre latitudes de 14°32'0'' y 32°43'0'', incluyendo la línea del Trópico de Cáncer y con una superficie de aproximadamente 2 millones de km²), recibe altos índices de irradiancia solar, un promedio superior a 4.6 kWh m⁻² día⁻¹ [3], comparable con regiones desérticas como el desierto de Atacama en Chile o el desierto de Sahara en África. México tiene alrededor cuenta con distintas redes de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio nacional [5]. Una de estas redes está conformada por las Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME) que consta de 136 estaciones meteorológicas distribuidas en el territorio nacional, que registran radiación solar global, temperatura del ambiente, velocidad y dirección del viento, entre otras variable en intervalos de 10 minutos. Los sensores de radiómetros instalados son principalmente piranómetros Kipp & Zonen CMP11 [3]. Sin embargo, en las estaciones meteorológicas no se miden las componentes directa y difusa de la radiación. Además, los

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Laguna. Paseo del Tecnológico 751. Colonia Ampliación La Rosita. Torreón, Coahuila, México. C. P. 27250.

² CONACYT – TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Av. Cuauhtémoc y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna S/N 27000, Torreón, Coahuila, México.

* sorozcoceros@gmail.com

datos de radiación solar global están disponibles sólo en unas pocas estaciones y por períodos cortos de tiempo o la calidad de los datos es muy mala por lo que la información no es útil en muchas aplicaciones [2], [6].

En diversas aplicaciones, como sistemas fotovoltaicos o concentración solar, es necesario conocer la radiación solar directa. En estos casos, con la información de las ESIME, es necesario emplear y desarrollar nuevos métodos para estimar la radiación solar directa a partir de la radiación solar global.

En el presente trabajo se emplea un método para la determinación de la radiación solar directa en las ciudades de Torreón, Saltillo y Durango, a partir de información disponible de radiación solar global de las ESIME del Servicio Meteorológico Nacional.

XIII. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y DIFUSA

La radiación solar, sobre una superficie horizontal, en sus componentes directa y difusa es de interés por dos razones principales. La primera es que los métodos para el cálculo de radiación total sobre superficies con diferente orientación a partir de datos sobre una superficie horizontal requiere tratamiento separado de la radiación directa y difusa, y la segunda es que la evaluación del funcionamiento de sistemas de sistemas fotovoltaicos o de concentración solar se basa en la estimación de la radiación solar directa [7], [8].

La radiación solar global, I , es la suma de la radiación solar directa y difusa sobre una superficie. La radiación solar directa, I_b , es la radiación recibida del Sol sin que haya sido dispersada por la atmósfera. Por el contrario la radiación solar difusa, I_d , es la radiación recibida del Sol después de que su dirección ha cambiado por la dispersión de la atmósfera, incluyendo múltiples reflexiones con distintos sistemas como las nubes.

La radiación solar total está dada [7], [8]:

$$I = I_b + I_d \tag{1}$$

A. Modelación de la radiación solar

Para estimar las componentes directa (I_b) y difusa (I_d) de la radiación solar se emplean diversas relaciones empíricas, derivadas del análisis estadístico de series temporales de radiación solar global y directa [6], [7]. Los modelos empíricos están basados en correlaciones entre índice de claridad mensual ($\overline{K_T}$), diario (K_T) y horario (k_T) y de la fracción de radiación solar difusa, I_d/I , (radiación solar difusa entre la radiación solar global) [6].

El índice de claridad horario es el flujo total de energía recibido del Sol en una superficie, I , sobre el flujo de energía recibido fuera de la atmósfera, I_o . En otras palabras, el índice claridad es la razón de la radiación en la superficie respecto del máximo teórico para dicha

localidad. El índice de claridad horario, k_T , está dado por [6], [9]-[11]:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \tag{2}$$

La radiación solar extraterrestre (fuera de la atmósfera) sobre una superficie horizontal, para un intervalo de tiempo [7] se calcula a partir de:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} e(t) \left[\cos\phi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin\phi \sin\delta \right] \tag{3}$$

donde G_{sc} es la constante solar ($1,367 \text{ W m}^{-2}$), ϕ es la latitud de lugar, δ es la posición angular del Sol al medio día solar y ω_1 y ω_2 es el ángulo horario para un t_1 y t_2 , respectivamente. En el Apéndice I se presenta la definición de estos parámetros y la expresión que permite determinarlos. $e(t)$ es el factor de corrección de excentricidad que considera la variación de la distancia entre la Tierra y el Sol a lo largo del año, y es calculado de acuerdo con (4):

$$e(t) = 1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \tag{4}$$

donde n es el día juliano. El día juliano es el número de día del año comenzando desde el primero de Enero y terminando el 31 de Diciembre, por lo que su valor oscila entre 1 y 365, o 366 para años bisiestos.

Para estimar las componentes directa y difusa de la radiación solar horaria se utilizó la aproximación de Erbs y col., que relaciona la fracción de radiación solar difusa horaria sobre un plano horizontal con el índice de claridad horario [7]. Las expresiones se enlistan en la Tabla I.

La radiación solar difusa horaria se determina a partir de información medida de radiación solar global (ver (2) y Tabla I) y posteriormente la radiación solar directa horaria se obtiene de (1).

TABLA I

EXPRESIONES DE ERBS Y COL. [7] PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIFUSA.

| | |
|---|-----------------------|
| $I_d/I = 1.0 - 0.09k_T$ | $k_T \leq 0.22$ |
| $I_d/I = 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4$ | $0.22 < k_T \leq 0.8$ |
| $I_d/I = 0.165$ | $k_T > 0.8$ |

B. Metodología

El Servicio Meteorológico Nacional, SMN, está conformado por varias redes de estaciones meteorológicas. Las dos principales redes son las Estaciones de Monitoreo Automático (EMA) y Estaciones Meteorológicas Sinópticas (ESIME). Los datos de mediciones de radiación solar global, para 3 ciudades del estado de Coahuila, se obtuvieron de las redes ESIME. Los datos fueron

proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional a través de la Comisión Nacional del Agua [5].

Los datos de radiación solar global comprenden información de las estaciones meteorológicas de Durango, Saltillo y Torreón, con mediciones en intervalos de 10 minutos, para un año completo (Agosto del 2013 a Agosto del 2014). En la Tabla II se presenta la ubicación geográfica de las ESIME consideradas en este trabajo.

TABLA II

ESIME DEL ESTADO DE COAHUILA [5].

| Ubicación | ϕ , °N | l_{loc} , °W | Altitud, msnm |
|--------------------|-------------|----------------|---------------|
| Torreón, Coahuila | 25.5333 | 103.4500 | 1,123 |
| Saltillo, Coahuila | 25.3763 | 101.0166 | 1,789 |
| Durango, Durango | 24.0947 | 104.5997 | 1,871 |

Los datos de las mediciones de radiación solar global fueron sometidos a diversos controles de calidad para identificar errores, inconsistencias y datos faltantes. Entre los criterios utilizados se encuentra comparar las mediciones contra valores plausibles (la radiación solar no puede exceder el valor de la constante solar o tener valores negativos) y valores dinámicos (la radiación se comparó contra la radiación solar global en ausencia de atmósfera, I_o). Además se hizo una inspección visual para identificar comportamientos anómalos, como mediciones por largos periodos con un valor constante, desfase temporal en las mediciones.

Para obtener la radiación solar global horaria se promedió la radiación medida cada 10 minutos de acuerdo a (5), en donde I_i corresponde a la radiación solar global medida cada 10 minutos.

$$I = \frac{\sum_i^n I_i}{n} \quad (5)$$

XIV. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del modelo empleado para determinar la radiación solar difusa y directa a partir de mediciones de la radiación global.

A. Índice de claridad, k_T

La distribución de la variabilidad del índice de claridad horario, definido en (2), en función del tiempo se determinó con la información de radiación solar global disponible para las ciudades de Torreón, Durango y Saltillo.

En la Figura 1 se presenta la variación del índice de claridad, k_T , en función del tiempo para Durango. Como se puede observar, en verano existe mayor dispersión de la radiación solar por los componentes (CO_2 , O_3 Troposférico, vapor de agua, aerosoles, contaminantes volátiles) presentes en la atmósfera obteniéndose índices de claridad inferiores a 0.5.

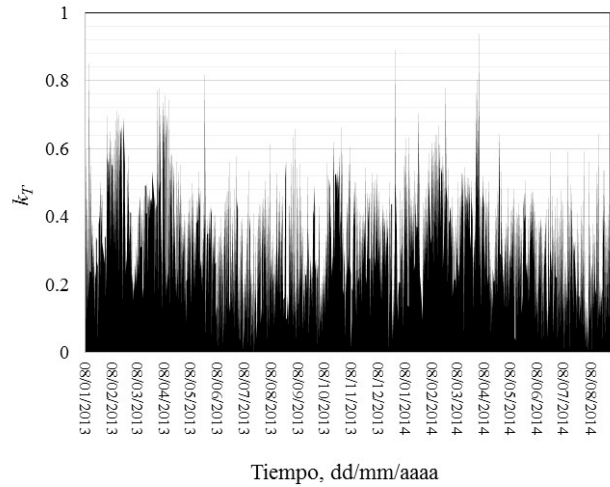


Figura 1. Variación de k_T en función del tiempo, para Durango (Enero 2013-Agosto del 2014).

De acuerdo con Yousif y col. [12], un día puede ser clasificado como nublado, parcialmente nublado, soleado o muy soleado en función del valor de índice de claridad. La clasificación se presenta en la Tabla III.

TABLA III

PARÁMETRO k_T [12].

| k_T | Tipo |
|----------|---------------------------|
| 0-0.2 | Nublado (N) |
| 0.2-0.6 | Parcialmente nublado (PN) |
| 0.6-0.75 | Soleado (S) |
| 0.75-1.0 | Muy soleado (MS) |

En la Figura 2 se compara la distribución del índice de claridad para las ciudades de Durango, Saltillo y Torreón. Como se puede observar en esta Figura, Saltillo tiene 16% y 40% del horas de nublado y parcialmente nublado, respectivamente. Durango y Torreón presentan más del 50% de las horas con condiciones de soleado y muy soleado. Esta información es útil para poder si algún lugar cuenta con el potencial para el desarrollo de proyectos de tecnología solar.

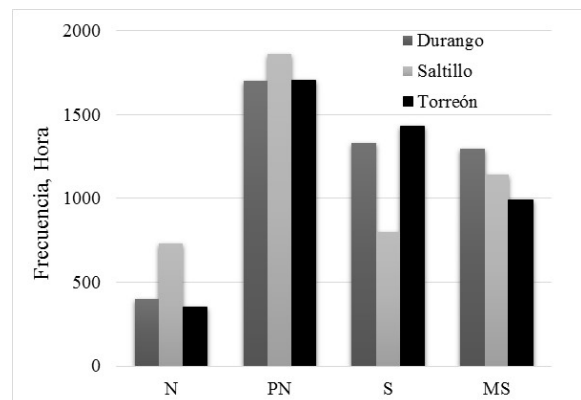


Figura 2. Distribución del índice de claridad, k_T , para las ciudades de Durango, Saltillo y Torreón (08/01/2013 al 07/01/2014).

B. Determinación de la radiación solar directa, I_b

La determinación de la componente directa de la radiación solar se realiza a partir de (1), para lo cual se emplean las expresiones propuestas por Erbs (Tabla I) para obtener la radiación difusa.

En la Figura 3 se presenta la distribución de la radiación solar directa, difusa y global para cuatro días en Torreón. En la Figura se puede visualizar las horas en las cuales la cubierta de nubes y la composición de la atmósfera atenúa la radiación directa, hasta valores mínimos. Por el contrario, para días soleados (25 de abril) la radiación directa es considerablemente mayor a la difusa para horas cercanas al medio día solar. El medio día solar se define como la hora del día en la que el Sol se encuentra en su punto más alto. El medio día solar depende de la longitud del lugar y el día juliano, y en general es diferente del medio día en el horario estándar (el que vemos todos nosotros en nuestros relojes).

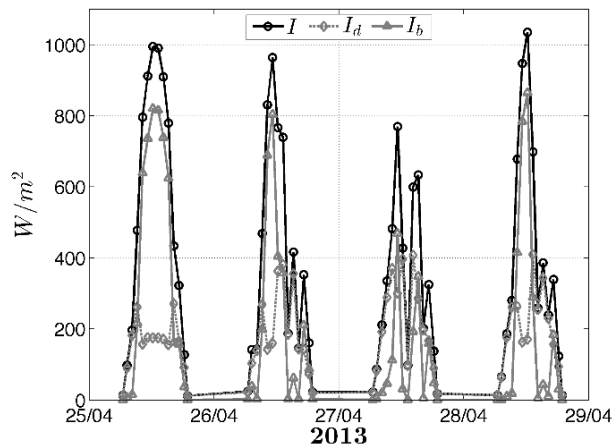


Figura 3. Variación de la radiación solar global, directa y difusa para las ciudades de Durango, Saltillo y Torreón, durante la estación de primavera del año del 2013.

En la Figura 3 se puede observar que cambios drásticos de la radiación directa conducen a una alta fracción de radiación difusa, lo cual se puede atribuir a la presencia de una cubierta delgada de nubes.

La correlación empleada (Tabla I) para determinar las componentes difusa y directa representa un comportamiento adecuado de la fracción de radiación difusa sobre una gran cantidad de horas. Por ello se considera un método aceptable en el diseño de proyectos relacionados con energía solar.

En la Figura 4 se muestra la dependencia de la radiación directa en función de índice de claridad, para las ciudades de Durango, Saltillo y Torreón. Para las ciudades de Durango y Saltillo se realizó el desplazamiento vertical con respecto I_b para su mejor visualización, ya que las tres curvas quedan sobrepuestas. La curva de los resultados

muestra un comportamiento similar para Durango, Saltillo y Torreón.

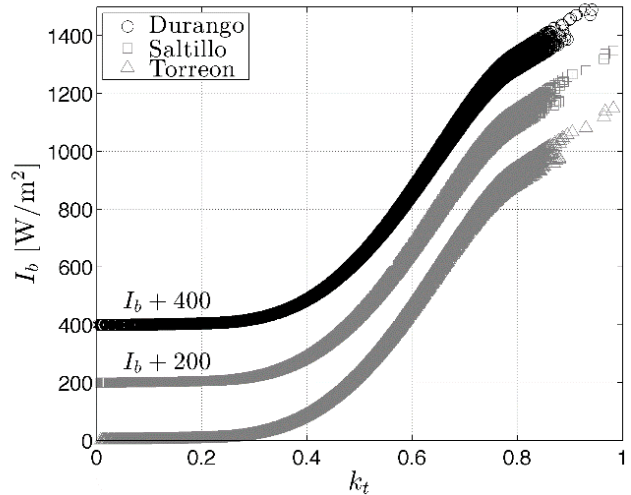


Figura 4. Dependencia de la radiación solar directa (I_b) con el índice de claridad (k_t), para las ciudades de Durango, Saltillo y Torreón.

XV. CONCLUSIONES

En diversas aplicaciones es necesario conocer la radiación solar directa y difusa, pero la información disponible únicamente incluye la radiación global. En tales casos es necesario calcular ambas componentes a partir de radiación solar global. En este trabajo se presentó la metodología para para obtener la radiación solar directa y difusa a partir de la radiación solar global. Para esto se utilizaron las expresiones propuestas por Erbs y col. Esta metodología se aplicó a las ciudades de Torreón, Saltillo y Durango. Los resultados muestran que la radiación solar directa presenta la misma relación con el índice de claridad para las tres ciudades consideradas. También se mostró que Saltillo tiene el mayor número de horas (56%) al día con nublados y parcialmente nublados, mientras que Durango y Torreón presentan el mayor número de horas al día con asoleamiento (~55%).

XVI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionar la información de las ESIME. M. Rivero agradece a Cátedras CONACYT.

XVII. APÉNDICE A: NOMENCLATURA Y DEFINICIONES.

En este apartado se definen los términos comúnmente utilizados en el estudio de la geometría solar. En [7], [8], [10] se puede encontrar una descripción más detallada.

ϕ , Latitud Ubicación angular norte o sur del Ecuador. Norte positivo.

$$-90 \leq \phi \leq 90 \quad (A.1)$$

δ , Declinación Posición angular de Sol al medio día solar con respecto al plano del Ecuador.

$$\delta = 23.45 \text{sen} \frac{360(284+n)}{365} \quad (A.2)$$

ω , Ángulo horario El desplazamiento angular del Sol este-oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra sobre su eje a 15° por cada hora, por la mañana negativos y por la tarde positivos.

$$\omega = 15(12 - (24 - T_s)) \quad (A.3)$$

θ_z , Ángulo cenit El ángulo entre la vertical y la línea al Sol, que es, el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie horizontal.

$$\cos\theta_z = \text{sen}\phi \text{sen}\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega \quad (A.4)$$

T_s , Tiempo solar Tiempo basado en el movimiento aparente del Sol a través del cielo. A medio día del tiempo solar, el Sol cruza el meridiano del observador.

$$T_s = T_{loc} + 4(l_{st} - l_{loc}) + E \quad (A.5)$$

l_{st} , Meridiano estándar Longitud del meridiano para la zona del tiempo local.

$$l_{st} = 15 \cdot UTC \quad (A.6)$$

donde UTC es el tiempo universal coordinado, (por sus siglas en inglés *Coordinated Universal Time*).

E , Ecuación Toma en cuenta las perturbaciones de la velocidad de rotación de la Tierra, la cual afecta el tiempo en que el Sol atraviesa el meridiano del observador.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos(B) - 0.032077\text{sen}(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089\text{sen}(B)) \quad (A.7)$$

donde:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (A.8)$$

XVIII. REFERENCIAS

[1] Meek D. W. (1997) "Estimation of maximum possible daily global solar radiation," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 87, pp. 223–241.
 [2] Mundo-Hernández J., De Celis Alonso B., Hernández-Álvarez J., y De Celis-Carrillo B. (2014) "An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 639–649.
 [3] Riveros-Rosas D., Arancibia-Bulnes C. A., Bonifaz R., Medina M. A., Peón R. y Valdes M. (2015) "Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model," *Renew.*

Energy, vol. 75, pp. 21–29.

[4] Tchinda. (2013) "Estimation of Diffuse Solar Radiation in the North and Far North of Cameroon," *Eur. Sci. Journals*, vol. 9, pp. 370–381.
 [5] CONAGUA, "Servicio Meteorológico Nacional."
 [6] Soares J., Oliveira A. P., Božnar M. Z., Mlakar P., Escobedo J. F. y. Machado A. J. (2004) "Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique," *Appl. Energy*, vol. 79, no. 2, pp. 201–214.
 [7] Duffie and W. Beckman J. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes, 3th ed.*, vol. 116.
 [8] Almorox J. y Hontoria C. (2004) "Fortran Programs for Computing the Clear Sky Solar Direct and Diffuse Spectral Irradiance," 1988.
 [9] Yorukoglu M. y Celik A. N. (2006) "A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2441–2450.
 [10] Almorox J. y Hontoria C. (2004) "Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1529–1535.
 [11] El-Sebaai A. A. y Trabea A. A. (2005) "Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces Over Egypt," *Egypt. J. Solids*, vol. 11, no. 281, pp. 73–82.
 [12] Yousif J. B. S. C. y Quecedo G. O. (2013) "Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain," *Renew. Energy*, vol. 49.

XIX. BIOGRAFÍA



Bioenergía.

Sayra Orozco. Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor de Cátedra del ITESM Campus Laguna. Las líneas de interés de la Dra. Orozco son los modelos para la estimación de la radiación solar, Tratamiento de aguas residuales, Procesos Avanzados de Oxidación, Remediación ambiental y



Procesamiento

Electromagnético de Materiales. Michel Rivero. Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador adscrito al CONACYT - Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Laguna. Las líneas de interés del Dr. Rivero es la dinámica de fluidos, implementación de modelos para la estimación y predicción del potencial eólico y solar, flujos magnetohidrodinámicos,