

AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

Avances en Ingeniería Química

Vol 1, No. 3



XLII Encuentro Nacional

Desafíos actuales en la investigación
y docencia en ingeniería química



Memorias del XLII Encuentro Nacional del AMIDIQ

Evento virtual del 08 al 11 de septiembre de 2021

EVALUACIÓN DE MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA PARA ESTIMAR LA IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA EN INCIDENCIA NORMAL (DNI) EN LA PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO (PSH).

Mario Alejandro Rendón-Ríos^{a*}, Ana Sophia Altamirano-Carranza^a, Rafael Enrique Cabanillas-López^a, Rodrigo Alonso-Suárez^b

^a Departamento de Ingeniería Química, División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales SN, Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

a215200828@unison.mx*

^b Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, UDELAR, J. H. y Reissig 565, C.P. 11300, Montevideo, Uruguay.

Resumen

Para modelar tecnologías de concentración solar o estimar la irradiancia global sobre un plano inclinado es necesario tener conocimiento de la irradiancia directa en incidencia normal. Una forma de estimar esta cantidad es a través de la medida de irradiancia global horizontal y modelos de fracción difusa. En este trabajo se consideran seis modelos de fracción difusa y se evalúan contra una base de datos terrestre medidos en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) que se ubica a 21 km al oeste de la ciudad de Hermosillo, Sonora (29° 01' 40" N, 111° 08' 44" O). La evaluación de estos modelos se realiza para la estimación de fracción difusa y DNI. La calidad de los datos medidos ha sido mejorada por el uso de cinco filtros, que eliminan perturbaciones de datos anómalos, teniendo como resultado una base de datos de buena calidad tanto de directa, como de difusa y de global. La evaluación del desempeño se realiza a escala minutil para los modelos originales, sin ser ajustados localmente, constatando que los modelos con múltiple predictores tienen mejor desempeño. Se obtiene que el modelo original de Ruiz-Arias con dos predictores es el que presenta mejor ajuste de todos los modelos considerados.

Introducción

Conocer el recurso solar disponible es una necesidad para el desarrollo de los emprendimientos que aprovechan la energía solar [1]. La irradiancia solar es aprovechable en sus componentes global, difusa y directa. La componente directa es aquella irradiancia que llega directo en incidencia normal desde el disco solar, sin ser dispersada en la atmósfera terrestre y se denomina DNI (Direct Normal Irradiance). La irradiancia difusa es la que llega de todas las direcciones luego de múltiples dispersiones en los componentes de la atmósfera o alrededores, y en plano horizontal se la conoce como DHI (Diffuse Horizontal Irradiance). A la suma de ambas componentes en un plano horizontal se le conoce como irradiancia global horizontal (GHI, Global Horizontal Irradiance). La DNI es aprovechada por diversas tecnologías de concentración solar (CST) [2]. Para su medición se necesita de equipos altamente especializados que requieren además de un seguimiento solar fino. Estos equipos, llamados pirheliómetros, son costosos y la necesidad del seguimiento solar introduce mayores requerimientos de mantenimiento y monitoreo diario. Alternativamente, se pueden utilizar modelos matemáticos de fracción difusa con base a datos de medición terrestre de GHI de buena calidad. La fracción difusa es el cociente entre la irradiancia difusa y global en plano horizontal [3]. Los modelos de fracción difusa relacionan esta variable con el índice de claridad (k_t , calculado de la GHI) u otras variables que sean de sencillo acceso o cómputo, como la masa de aire (m) o variables atmosféricas [4]. Conocida o estimada la fracción difusa, es posible calcular la DHI y consecuentemente la DNI a través de la ecuación de clausura, que relaciona geoméricamente estas cantidades según $GHI = DHI + DNI \cos(\theta_z)$.

Datos

➤ Base de datos.

Los datos que se utilizaron en este trabajo consisten en un conjunto de medidas de GHI, DHI y DNI registradas en la PSH. Según la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger la región categoriza como BWh, considerado árido cálido. Las tres medidas (GHI, DHI y DNI) fueron colectadas en intervalos minutil durante el periodo de tiempo desde enero/2019 hasta diciembre/2020, completando dos años de

datos. Para GHI se utilizó un piranómetro Kipp & Zonen CM11, para DHI un piranómetro Kipp & Zonen CM11 usando una esfera de sombreado y para DNI un pirheliómetro Kipp & Zonen CHP 1. Los instrumentos fueron montados en el sistema de seguimiento solar Kipp & Zonen SOLYS2.

➤ Filtrado de calidad.

La irradiancia global horizontal normalizada se denomina como índice de claridad instantáneo, k_t , definido como $k_t = \text{GHI}/\text{GHI}_0$, donde GHI_0 es la irradiancia solar en plano horizontal al tope de la atmósfera. La f_d , está definida como $f_d = \text{DHI}/\text{GHI}$. Para condiciones nubladas, $k_t \rightarrow 0$ y $f_d \rightarrow 1$. Para cielo despejado, $k_t \approx 0.80$ y f_d toma valores por debajo de ≈ 0.15 , los cuales dependen de la composición local de la atmósfera. Se implementó una secuencia de cinco filtros para tener una base de datos de calidad. En primer lugar, se aplicó un filtro base F0 para obtener únicamente las medidas diurnas con lecturas positivas para la GHI, DHI y DNI. Luego, el filtro F1 que es un filtro manual de inspección visual donde se invalidan lecturas que son evidentemente anormales en la serie temporal, asociadas a eventuales sombreamientos regulares o desalineaciones del equipo de seguimiento. F2 invalida las lecturas cuando la altura solar es menor a 7° , para evitar datos de baja altura solar, que son susceptibles de mayores errores relativos en la medida. F3, F4 y F5 son filtros aplicados por la BSRN (Baseline Solar Radiación Network, por sus siglas en inglés) [5]. El F3 considera límites superiores e inferiores localmente ajustados para la componente GHI, DHI y DNI. F4 considera límites para el cociente entre GHI medida y la GHI calculada a través de la ecuación de clausura (con DHI y DNI). El último filtro F5 pone límite para la fracción difusa, según lo indica el manual de la BSRN. Los datos que pasaron los cinco filtros son el conjunto de datos final que se utilizarán para la evaluación de desempeño de los modelos de fracción difusa. El resumen de los filtros y de los datos eliminados por cada uno se encuentra en la Tabla 1, que también especifica las características de cada filtro. La Figura 1 ilustra el resultado del filtrado, donde se observan en gris los datos originales que fueron descartados por el procedimiento de calidad. Los puntos negros en esta figura representan un gráfico f_d vs k_t típico.

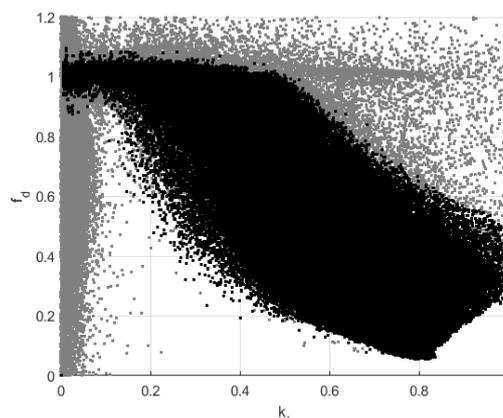


Figura 1.- fracción difusa 1-minutal f_d , vs. índice de claridad, k_t .

Filtro	Condiciones	Minutos	%
F0	$\cos\theta_z \geq 0$ & $\text{GHI} > 0$ & $\text{DHI} > 0$ & $\text{DNI} > 0$	527614	
F1	Filtro Manual	527155	0.09
F2	$\cos\theta_z > 0.12$ ($\alpha_s \geq 7^\circ$)	478338	9.26
F3	Límites superiores e inferiores para GHI, DHI y DNI localmente ajustados.	475351	0.62
F4	Límite para el cociente de GHI y GHI_c , $\pm 8\%$ para $\theta_z < 75^\circ$ & $\pm 15\%$ para $\theta_z > 75^\circ$	472117	0.68
F5	Límite para fracción difusa, $f_d < 1.05$ para $\theta_z < 75$ & $f_d < 1.1$ para $\theta_z > 75$	471789	0.07
Todos	% descartados		10.7

Tabla 1.- Secuencia de los filtros aplicados para los datos 1-minutal de irradiancia para el lugar de la PSH. Para el número de minutos que pasaron cada filtro y el porcentaje de medidas descartadas están indicados. Un total de datos para utilizar es de 471789 medidas diurnas 1-minutal, descartando un 10.7% de medidas diurnas por este proceso.

Metodología

Los modelos que se utilizaron en este trabajo son los que se describen a continuación. La nomenclatura de los modelos sigue el trabajo de Abal et al. (2017) [4]. Los valores de los coeficientes para cada modelo se encuentran en la Tabla 2.

➤ **Modelo OH y EKD.**

Dos modelos históricos son el modelo de Orgill y Hollands (1977) (OH) [6] y el modelo de Erbs et al. (1982) (EKD) [7]. Estos modelos se componen de polinomios a tramos (Ec. 1) y difieren en principalmente en su forma funcional, donde el modelo OH utiliza una expresión lineal para todos los tramos ($b_2=b_3=b_4=0$) y límites de tramos en $k_a=0.35$ y $k_b=0.75$ con continuidad, y el modelo EKD utiliza un polinomio de mayor grado en el tramo central y límites en $k_a=0.22$ y $k_b=0.80$, además de restricciones de continuidad y continuidad en la derivada en estos puntos.

$$f_d = \begin{cases} 1 + a_1 k_t & k_t < k_a \\ b_0 + b_1 k_t + b_2 k_t^2 + b_3 k_t^3 + b_4 k_t^4 & k_a \leq k_t \leq k_b \\ c_0 & k_t > k_b. \end{cases} \quad (1)$$

➤ **Modelo BSL.**

Boland et al. (2001) [8], propusieron un modelo de fracción difusa (BSL) con un solo predictor (k_t) utilizando una función logística con solo dos coeficientes. Existe un modelo de esta familia que utiliza más predictores [9], usualmente destacado como uno de los de mejor desempeño, cuya implementación queda para futuros trabajos dado su mayor complejidad de implementación.

$$f_d = [1 + \exp(a_0 + a_1 k_t)]^{-1} \quad (2)$$

➤ **Modelo Ruiz-Arias (RA1, RA2s).**

Ruiz-Arias et al. [10], propusieron modelos regresivos tipo Gompertz de doble exponencial (RA1 y RA2s) para estimar la fracción difusa bajo todas las condiciones de cielo. Los modelos se basan en una función sigmoidea y utilizan el índice de claridad (RA1) y la masa de aire (RA2s) como predictores.

$$f_d = a_0 + a_1 e^{-\exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 k_t^2 + a_5 m + a_6 m^2)} \quad (3)$$

➤ **Modelo SO2.**

Skartveit y Olseth 1987 [11], propusieron un modelo de fracción difusa no lineal de compleja formulación en términos de la altura solar (α_s) y el índice de claridad.

$$f_d(k_t, \alpha_s) = \begin{cases} 1 & k_t \leq k_a \\ f(k_t, \alpha_s) & k_a \leq k_t \leq \alpha k_b(\alpha_s) \\ f(\alpha k_b, \alpha_s) & k_t \geq \alpha k_b(\alpha_s) \end{cases} \quad (4)$$

Donde $\alpha = 1.09$, $k_b(\alpha_s) = r + s \exp(-\alpha_s/\alpha_0)$ y $\alpha_0 = 0.291$ rad. Las funciones no lineales son:

$$f(k_t, \alpha_s) = 1 - (1 - d_1)[a\sqrt{K} + (1 - a)K^2], \quad \kappa(k_t, \alpha_s) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\pi \left(\frac{k_t - k_a}{k_b - k_a} - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

$$d_1(\alpha_s) = r' + s' \exp(-\alpha_s/\alpha_0).$$

➤ **Métricas de desempeño**

Los modelos originales se evaluaron contra los datos filtrados y se utilizaron cuatro indicadores para evaluar su desempeño. Para N datos y donde y representa el valor estimado a evaluar y y^{ref} el valor de referencia. El primer indicador se le llama desvío promedio MBD (Mean Bias Deviation) (ec. 6), y cuantifica el desvío promedio de los datos estimados en comparación a los datos de referencia. Este indicador distingue si el valor a evaluar está, en promedio, por encima o por debajo de la referencia, y por tanto mide el sesgo sistemático de los modelos. El segundo indicador es la desviación absoluta media MAD (Mean Absolute Deviation) (ec.7), describe la variación de los valores de un conjunto de datos con

respecto a su media. El tercer indicador es el desvío cuadrático medio RMSD (Root Mean Square Deviation) (ec. 8), que cuantifica la dispersión de los datos. El cuarto indicador está basado en la prueba de Kolmogorov-Smirnov KSI (Kolmogorov-Smirnov Integral) (ec. 9) usando las funciones de distribución acumulativa $F(Y)$ y $\hat{F}(Y)$ para las variables medidas y las estimadas por los modelos respectivamente. Este indicador da información acerca de la similitud entre las distribuciones estadísticas de los datos de referencia y los datos estimados por el modelo.

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{ref}), \quad rMBD = 100 \times \frac{MBD}{\langle y \rangle} \quad (6)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y_i^{ref}|, \quad rMAD = 100 \times \frac{MAD}{\langle y \rangle} \quad (7)$$

$$RMSD = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{ref})^2 \right]^{1/2}, \quad rRMSD = 100 \times \frac{RMSD}{\langle y \rangle} \quad (8)$$

$$KSI = \int_0^1 D(Y) dY, \quad D(Y) = |\hat{F}(Y) - F(Y)| \quad (9)$$

Los primeros tres indicadores pueden ser expresados en términos relativos a la media de los datos de referencia, y se denotan respectivamente rMBD, rMAD y rRMSD. Los cuatro indicadores (los tres indicadores relativos más el KSI absoluto) se utilizaron para evaluar cada modelo para la estimación de fracción difusa y DNI.

OH (ec 1)		EKD (ec1)		BSL (ec 2)		RA1 (ec 3)		RA2s (ec 3)		SO2 (ec 4)	
coef	Original										
a ₁	-0.25	a ₁	-0.09	a ₀	-5	a ₀	0.95	a ₀	0.98	a	0.27
b ₀	1.557	b ₀	0.9511	a ₁	8.6	a ₁	-1.04	a ₁	-1.02	r'	0.15
b ₁	-1.84	b ₁	-0.1604			a ₂	2.3	a ₂	2.88	s'	0.43
b ₂	0	b ₂	4.388			a ₃	-4.7	a ₃	-5.59	r	0.87
b ₃	0	b ₃	-16.638			a ₄	0	a ₄	0	s	-0.56
b ₄	0	b ₄	12.336			a ₅	0	a ₅	-0.11	k _a	0.2
c ₀	0.18	c ₀	0.165			a ₆	0	a ₆	0		

Tabla 2.- Coeficientes con valores originales para cada modelo. "coef" es el coeficiente de cada modelo.

Resultados

Utilizando una base de datos previamente filtrada, para asegurar su calidad, se compararon cuatro modelos para la estimación de la fracción difusa y, por lo tanto, del valor de la DNI, se obtuvieron los indicadores de desempeño que se reportan en la Tabla 3.

Para fracción difusa, el modelo que presenta menor sesgo es el RA2s. La mayoría de los modelos en su versión original presentan un sesgo positivo, algunos de ellos grandes (OH, EKD, BSL y SO2). En particular, los modelos de Ruiz-Arias son los que presentan menor sesgo, siendo el RA2s el único con sesgo negativo, pero al mismo tiempo el menor en valor absoluto. Los valores de rRMSD en fracción difusa están en el rango de 35.9-43.3%. En términos de dispersión el ordenamiento de los modelos se mantiene igual, pero en este caso se observa una mayor diferencia de desempeño a favor del modelo RA2s. Para los modelos de Ruiz-Arias los valores del KSI estuvieron cercanos en un rango de 4.7-5.3 en la similitud entre las distribuciones, diferenciándolos con respecto a los demás modelos que tuvieron valores en el rango de 6.2-8.0. Para DNI se obtienen valoraciones similares en cuanto al desempeño de los modelos, cambiando el valor cuantitativo de las métricas. Como era de esperar, los modelos con sesgos positivos en la evaluación para fracción difusa tienen sesgos negativos en DNI. Consecuentemente, los modelos originales con mayor sesgo negativo para estimación de DNI son OH, EKD, BSL y SO2, entre -6.5% y -9.7%. Los modelos originales de Ruiz-Arias son los que presentan mejor sesgo en la estimación

de DNI, destacando el RA2s. El rRMSD para todos los modelos está entre 16% y 19%. Se observa nuevamente que el modelo RA2s destaca en esta métrica, en el entorno del 16%, en comparación al resto que se ubica en el rango 17-19%. El KSI está en el rango entre 5.4-5.9, excepto para el SO2. Destaca especialmente la capacidad de este modelo en su versión original en representar estadísticamente a la DNI, con un KSI aproximadamente 3 veces inferior al resto. En general, los indicadores para DNI de todos los modelos tienen un mejor desempeño a comparación de los de fracción difusa, con una menor incertidumbre para estimar los datos.

En suma, el modelo con mejor desempeño para la zona árida cálida de la PSH es el RA2s con múltiples predictores, destacando en los indicadores. Tiene los mejores rMBD y rRMSD para fracción difusa (-1.3% y 35.9%, respectivamente) y DNI (+0.4% y 15.9%, respectivamente), y por tanto es la opción de menor incertidumbre para estimar la f_d y DNI en la región. El segundo modelo en desempeño es el RA1. El resto de los modelos (OH, EKD, BSL y SO2) presentan indicadores de desempeño mayores, especialmente en lo que refiere a sesgo. Es importante hacer notar que estas valoraciones no refieren a la naturaleza de cada modelo, dado que el desempeño es críticamente afectado por el valor de sus coeficientes, que fueron ajustados con conjuntos de datos en otras partes del mundo. Aquí lo que se establece es un ranking e incertidumbre típica de los modelos con sus coeficientes originales, buscando dar información a los usuarios que los utilicen como modelos universales, algo que es común en la industria. El ajuste local de todos estos modelos mejorará su desempeño, en especial su sesgo, y es parte de nuestro trabajo actual. Es notable que los modelos con múltiples predictores tienen un mejor desempeño en comparación a los modelos con un solo predictor (k_t), dado que representan mejor la nube de puntos. Se observa aquí que es importante añadir información extra (además de k_t), como la masa de aire (m) o la altura solar (α_s). En las Figuras de la 2 a la 5 se muestra el comportamiento de los modelos en relación a los datos para los modelos EKD, RA2s, BSL y SO2, respectivamente.

Indicador	Fracción difusa						DNI					
	OH	EKD	BSL	RA1	RA2s	SO2	OH	EKD	BSL	RA1	RA2s	SO2
rMBD (%)	18.3	15.9	16.0	3.3	-1.3	21.4	-7.9	-6.5	-6.5	-1.7	0.4	-9.7
rMAD (%)	35.2	32.4	34.7	31.2	26.1	34.1	14.8	13.7	14.7	12.8	11.0	14.9
rRMSD (%)	42.5	40.9	43.3	39.4	35.9	38.9	18.1	17.3	18.7	17.0	15.9	17.2
KSI x 100	7.2	6.2	6.8	5.2	4.7	8.0	5.7	5.4	5.7	5.9	5.8	1.9

Tabla 3. - Comparación de los indicadores de desempeño para la estimación de fracción difusa y DNI por cada modelo original. La media de fracción difusa y DNI fue de 0.32 y 646.90W/m² respectivamente.

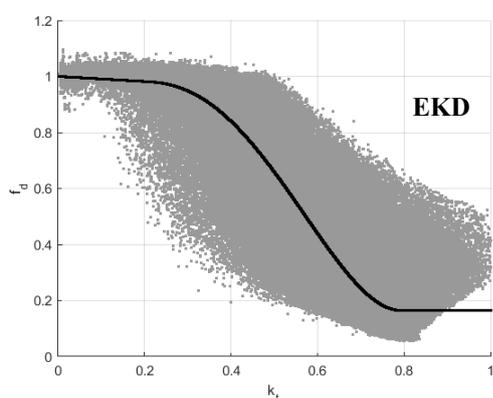


Figura 2. - Modelo EKD (ec.1). En el fondo, los datos filtrados son la sombra.

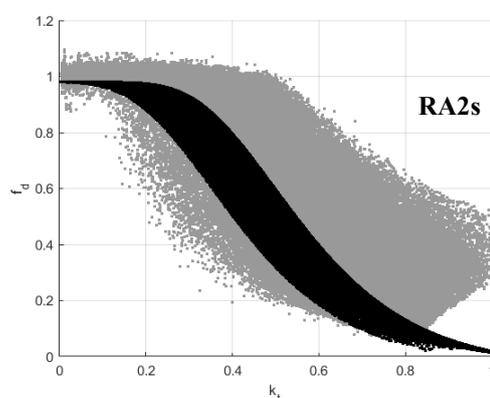


Figura 3. Modelo RA2s (ec.3). En el fondo, los datos filtrados son la sombra.

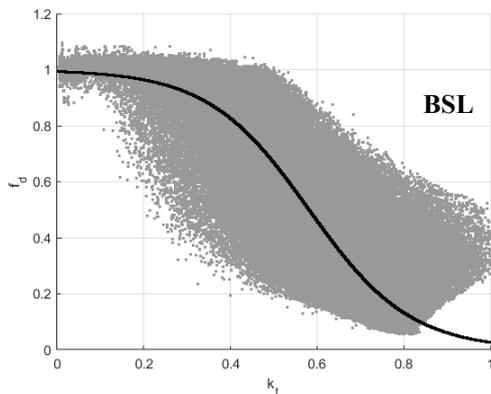


Figura 4.- Modelo BSL (ec.2). En el fondo, los datos filtrados son la sombra.

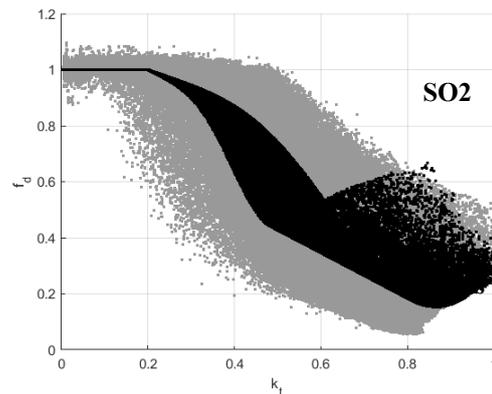


Figura 5.- Modelo SO2 (ec.4). En el fondo, los datos filtrados son la sombra.

Conclusiones

Se obtiene una base de datos de alta calidad para las distintas componentes de la radiación solar en la ubicación de la PSH, la cual sirve de punto de referencia para el análisis de distintos modelos estimativos de la radiación solar. Cuatro modelos fueron analizados en este estudio con la finalidad de seleccionar el que mejor se ajuste a las características propias de la región, obteniéndose las siguientes conclusiones:

Al comparar las métricas de desempeño se encuentra que algunos modelos presentan mejores predicciones en sus estimaciones que los restantes por lo que se puede afirmar que los dos modelos con múltiples predictores tuvieron un mejor desempeño en la dispersión de los datos, pudiendo incluso mejorarse a través de un ajuste local, por ejemplo, para el modelo SO2. Se obtiene que el modelo RA2s de doble exponencial (Ruiz-Arias,2010) es el modelo con el mejor desempeño para la zona árida cálida de la región bajo estudio, con una incertidumbre para la estimación de fracción difusa de 35.9% y de 15.9% para la DNI, con sesgos pequeños, de -1.3% y +0.4%, respectivamente. En este trabajo, se realizó la evaluación de modelos en su versión original. En próximos trabajos se podrá ajustar estos modelos a datos locales, disminuyendo la incertidumbre y así obtener mejoras en los modelos para estimar la fracción difusa y DNI en la región.

Referencias

1. Alonso-Suárez, Rodrigo, et al. "Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar." (2019).
2. Blanc, Philippe, et al. "Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue." *Solar Energy* 110 (2014): 561-577.
3. Abal, Gonzalo, and Valeria Durañona. "Manual técnico de energía solar térmica. Volumen I: Fundamentos." (2013).
4. Abal, G., et al. "Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay." *Solar Energy* 141 (2017): 166-181.
5. Long, Charles N., and Ellsworth G. Dutton. "BSRN Global Network recommended QC tests, V2. x." (2010).
6. Orgill, J., Hollands, G., 1997. *Sol. Energy* 19,354.
7. Erbs, D. G., S. A. Klein, and J. A. Duffie. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation." *Solar energy* 28.4 (1982): 293-302.
8. Boland, J., Scott, L., Luther, M., 2001. *Environmetrics* 12, 575.
9. Ridley B, Boland J, Lauret P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*. 2010.
10. Ruiz-Arias, J. A., et al. "Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions." *Energy Conversion and Management* 51.5 (2010): 881-893.
11. Skartveit A, Olseth JA. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar energy*. 1987;38(4):271-4.