

Evaluación del modelo de Bird y Hulstrom para la estimación del recurso solar disponible en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana

Evaluation of the Bird and Hulstrom Model for the estimation of the solar resource available in the city of Barranquilla and its metropolitan area

Cristian Saavedra Castañeda¹, Marley Vanegas Chamorro², Guillermo Valencia Ochoa³

¹Ingeniero Químico, Asistente de Investigación del Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Ká, Barranquilla, Colombia.

²Doctor por la Universidad de Oviedo, Docente del Programa de Ingeniería Química, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de Energía, Ká, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

³Magister en Ingeniería Mecánica, Docente del Programa de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de Energía, Ká, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

*Autor: ccsaavedra@gmail.com

Recibido: 30/03/2019

Aceptado: 30/05/2019

Cite this article as : C. Saavedra, M. Vanegas, G. Valencia "Evaluación del modelo de Bird y Hulstrom para la estimación del recurso solar disponible en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana", *Prospectiva*, Vol 17, N° 1, 96-103, 2019.

RESUMEN

El artículo analiza el modelo de Bird y Hulstrom con el propósito de conocer los criterios que se deben tener en cuenta en su formulación, y observar el grado de precisión de éste en lo que respecta a la predicción del recurso solar. La importancia de esta evaluación radica en la posibilidad de desarrollar herramientas que permitan a instituciones e investigadores estimar el recurso solar con un alto grado de exactitud y precisión, sin disponer de tecnologías específicas para dicho fin. Para cumplir este propósito, se sometieron los datos estimados con este modelo a un análisis de regresión contra datos obtenidos de mediciones directas realizadas a través de piranómetros en tres estaciones, una ubicada en la ciudad de Barranquilla y las otras dos ubicadas en municipios pertenecientes a su área metropolitana (Puerto Colombia y Soledad). Por otra parte, se comparó su coeficiente de correlación con el del modelo de Angström-Prescott utilizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con el objetivo de tener un estándar que permitiera tener conclusiones con respecto al grado de precisión y ajuste del modelo. Se encontró que el modelo de Bird y Hulstrom no representa una mejora significativa en el ajuste de los datos en comparación con el modelo utilizado por el IDEAM (Angström-Prescott). También se concluyó que el recurso solar en la ciudad de Barranquilla es uno de los mejores del país, con un promedio de incidencia que se mueve entre 5,25kWh/m² y 6,8kWh/m² a lo largo del año.

Palabras clave Radiación solar; modelo de Bird y Hulstrom, modelo de Angström-Prescott, Análisis de regresión.

ABSTRACT

The article analyzes the model of Bird and Hulstrom with the purpose of knowing the criteria that must be taken into account in its formulation, and to observe the degree of precision of this in regard to the prediction of the solar resource. The importance of this evaluation lies in the possibility of developing tools that allow institutions and researchers to estimate the solar resource with a high degree of accuracy and precision, without having specific technologies for that purpose. To fulfill this purpose, the data estimated with this model were subjected to a regression analysis against data obtained from direct measurements made through pyranometers in three stations, one located in the city of Barranquilla and the other two located in municipalities belonging to its metropolitan area (Puerto Colombia and Soledad). On the other hand, its correlation coefficient was compared with that of the Angström-Prescott model used by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), with the aim of having a standard that would allow conclusions regarding the degree of precision and adjustment of the model. It was found that the Bird and Hulstrom model does not represent a significant improvement in the fit of the data compared to the model used by the IDEAM (Angström-Prescott). It was also concluded that the solar resource in the city of Barranquilla is one of the best in the country, with an average incidence that moves between 5.25kWh / m² and 6.8kWh / m² throughout the year.

Key words: Solar radiation, Bird and Hulstrom model, Angström-Prescott model, Regression analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Frente al prominente desarrollo de tecnologías que buscan explotar los recursos renovables como fuentes alternativas de energía y la certeza de que el soleado clima tropical de esta región del país es óptimo para la explotación del recurso solar, se hace imprescindible desarrollar herramientas que permitan cuantificar el potencial de dicho recurso. Por lo que en el marco de esta investigación se analizaron distintos modelos en una línea temporal de mejoras continuas desde los aportes de Fowle en lo que respecta a las transmitancias por allá en 1915[1], pasando por modelos más complejos como el modelo de Hoyt[2] donde se comienza a incorporar la componente directa de la radiación y no solo el componente isótropo y circumsolar como hacían Davies & Hay o Watt en 1978[3], hasta llegar a los modelos que se analizan en este documento, los cuales se seleccionaron para su análisis no solo por ser los más completos y rigurosos sino porque en el caso del modelo de Angström-Prescott[4] que se usó como referente para evaluar el modelo de Bird y Hulstrom[3], cuenta con el aval de instituciones como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que utiliza este modelo para realizar sus estimaciones en las estaciones que no cuentan con equipos de medición directa de la radiación.

Por otra parte, trabajos como los realizados por Villacaña[5], son evidencia de que este tipo de herramientas matemáticas pueden convertirse en una pieza clave en todo tipo de investigaciones o trabajos en torno a la caracterización y explotación del recurso solar para cualquier investigador o institución que no cuente con equipos complejos y costosos de medición directa como lo son los piranómetros.

A continuación, se presentará una breve descripción del modelo a evaluar junto con el modelo estándar que se usará como referencia para dicha evaluación.

1.1. Modelo de Bird y Hulstrom

Bird y Hulstrom analizaron varios modelos que se habían venido desarrollando desde 1940. Para la irradiancia directa se concentraron en los modelos de Atwater y Ball, de Hoyt, de Lacis y Hansen, de ASHRAE y de Watt. Por otro lado, también estudiaron los modelos de irradiancia difusa de Atwater y Ball, de Davies y Hay, de Watt, de Hoyt y el de Lacis y Hansen[6][3].

1.1.1. Radiación solar total

Inicialmente se propone la expresión de radiación solar total que es genérica para la mayoría de los modelos y equivale a la suma de la radiación directa y difusa tal como se describe en la siguiente ecuación [3].

$$I_{TH} = I_{DH} + I_{dH} \quad (1)$$

1.1.2. Irradiancia directa

Seguidamente para la determinación de la irradiancia directa se sigue la siguiente expresión:

$$I_{DH} = [0,9662 \cdot C_r (\tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a)] \cdot \text{sen}A \quad (2)$$

Donde:

C_r : constante solar.

A : es la altitud solar en grados.

0.9662 : factor de corrección que se ajusta a las longitudes de onda de 0.3 a 3 μm del espectro solar, considerado por el código SOLTRAN[3].

τ_r : Es la transmitancia por moléculas de aire.

τ_o : Es la transmitancia debida al espesor de la capa de ozono.

τ_g : Es la transmitancia debida a la absorción de los gases uniformemente miscibles del aire.

τ_w : Es la transmitancia debida a la presencia del vapor de agua.

τ_a : Es la transmitancia debida a los aerosoles.

1.1.3. Irradiancia difusa

Por su parte la irradiancia difusa está compuesta por la irradiancia difusa debida a la dispersión por moléculas de aire (I_{dr}), irradiancia difusa debida a la presencia de aerosoles (I_{da}) e irradiancia debida a la reflexión de la superficie[3].

$$I_{dH} = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (3)$$

1.1.4. Irradiancia difusa debida a la dispersión por moléculas de aire

La irradiancia difusa debida a la dispersión por moléculas de aire (I_{dr}) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$= 0,79 \cdot C_r (\tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa}) 0,5 \left(\frac{(1 - \tau_r) \text{Sen}A}{1 - m_a + m_a^{1,02}} \right) \quad (4)$$

Donde:

τ_{aa} : transmitancia debida a la absorción de aerosoles.

m_a : masa de aire relativa.

1.1.5. Irradiancia difusa debida a la presencia de aerosoles

La irradiancia difusa debida a la presencia de aerosoles (I_{da}) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{da} = 0,79 \cdot C_r (\tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa}) F_c \left(\frac{(1 - \tau_{as}) \text{Sen}A}{1 - m_a + m_a^{1,02}} \right) \quad (5)$$

τ_s : transmitancia debida a la difusión por aerosoles.

1.1.6. Irradiancia difusa por múltiple reflexión

$$I_{dm} = (I_{DH} \cdot SenA + I_{dr} + I_{da}) \left(\frac{\rho_g \rho'_a}{1 - \rho_g \rho'_a} \right) \quad (6)$$

ρ'_g : coeficiente de reflexión de la superficie.
 ρ'_a : coeficiente de reflexión del cielo.

1.2. Modelo de Ångström-Prescott

La ecuación de Ångström-Prescott define genéricamente la relación entre la energía solar disponible a nivel del suelo y la duración del sol [7]. El modelo sigue el siguiente esquema de ecuaciones:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N'} \quad (7)$$

Donde:

H : Promedio mensual de la radiación global diaria (Wh/m²día).

H_0 : promedio mensual de la radiación global diaria del cielo claro para la ubicación en un día determinado.

n : uración real del sol en un día, respectivamente, (horas)

N' : Promedio mensual de la duración máxima de la luz solar brillante en un día, también conocida como longitud media mensual del día en horas.

a y b : Coeficientes empíricos. Estos coeficientes son coeficientes específicos de la ubicación denominados fracciones de radiación extraterrestre en días nublados y días despejados, respectivamente [8].

La relación n/N' Se denomina índice sin nubes. Proporciona información sobre las características atmosféricas y las condiciones del área de estudio[4].

La relación de la radiación solar en la superficie de la Tierra (H) y la radiación extraterrestre (H_0), es decir, H/H_0 , se llama Índice de Claridad. Los valores de la radiación extraterrestre diaria promedio mensual (H_0) se calculan a partir de la ecuación 3.2 [4].

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \times I_{sc}}{\pi} \times \left[1 + 0,33 \cos \left(\frac{360 \times d}{365} \right) \right] \times \left[\cos \varnothing \cos \delta \sin \omega + \frac{\pi \omega}{180} \sin \varnothing \sin \delta \right] \quad (8)$$

Donde:

I_{sc} : constante solar (1367W/m²)

d : día Juliano

\varnothing : latitud del lugar $\omega = \text{acos}(-\tan \varnothing \tan \delta)$

δ : ángulo de declinación solar

ω : ángulo de puesta del sol y $\omega = \text{acos}(-\tan \varnothing \tan \delta)$

2. METODOLOGÍA

La metodología se divide en tres etapas que engloban los lineamientos que se siguen desde la recolección de los datos hasta la verificación del modelo.

2.1. Primera etapa: recolección de datos y caracterización del cielo

2.1.1. Recolección de datos

Para la recolección de los datos se contó con tres estaciones ubicadas en tres diferentes puntos, dos estaciones administradas por el IDEAM y una estación instalada en la Universidad del Atlántico, de las dos primeras se tomó un conjunto de datos registrados desde el 2014 hasta el 2015 a las 7, 13 y 19 horas. Se seleccionó este periodo puesto que desde el año 2014 se empezó a medir la radiación solar mediante piranómetros en dichas estaciones. La tercera estación es una estación instalada en la Universidad del Atlántico la cual recolectó datos durante un período de un mes, pero los datos tomados fueron en intervalos de tiempo mucho menores (cada 10 minutos). En la Tabla 2.0 se presentan las características de las estaciones del IDEAM y de la Universidad del Atlántico instaladas en Barranquilla, Puerto Colombia y Soledad.

Tabla 2.1. Geolocalización de las estaciones meteorológicas
 Table 2.1. Geolocation of weather stations

Estación APTO. Ernesto Cortissoz		
Latitud:	10,8833	Periodo Promedio 2014/2015
Longitud:	-74,768	
Altura:	14	
Estación las Flores		
Latitud:	11,0400	Periodo Promedio 2014/2015
Longitud:	-74,820	
Altura:	2,0	
Estación Universidad del Atlántico		
Latitud:	11,0190	Periodo Promedio oct. 26 – nov. 26 del 2016
Longitud:	-74,871	
Altura:	44	

2.1.2. Caracterización del cielo

Otra variable que se analizó fue el grado de turbidez del cielo (β), el cual se puede analizar de acuerdo con la clasificación que hace el Global Learning and Observations to Benefit the Environment[9], donde:

$\beta=0.00$: donde se considera que la atmósfera es extremadamente limpia, es decir apenas existen partículas o moléculas que atenúan la radiación, generalmente el cielo presenta un color azul profundo. Esta condición es inusual en la Tierra.

$\beta=0.10$: la atmósfera se considera despejada, lo que indica un cielo libre de nubosidad de color azul que tiene lugar sólo en determinadas ocasiones.

$\beta=0.20$: la atmósfera presenta una apariencia de un cielo despejado con una ligera nubosidad, esta característica

es más común y algunos autores los identifican como un cielo de color azul claro, con algo de calima.

$\beta=0.30$: la atmósfera presenta un grado de turbidez que indica una mayor nubosidad, en estas condiciones el cielo tiene un color azul pálido, con más calima.

$\beta=0.40$: la atmósfera presenta un aspecto turbio, en este caso, el cielo presenta un color “lechoso” característico de la extrema calima.

Toda esta caracterización se hizo analizando mapas de profundidad óptica de aerosoles y fotografías satelitales del cielo de Barranquilla y su área metropolitana, pero como este tipo de caracterización solo es cualitativa, se estimaron las radiaciones para cada uno de los tipos de atmósfera y se sometieron al análisis de regresión en la etapa de comparación y verificación para establecer el verdadero tipo de cielo.

2.2. Segunda etapa: evaluación del modelo

Para evaluar el modelo y obtener sus respectivas estimaciones de radiación solar, se utilizaron algunas plantillas de Excel con hojas de cálculo para los datos de los años en estudio, promedios anuales, estimaciones promedio de las variables del modelo y finalmente con las estimaciones de las transmitancias y de la radiación solar para diferentes constantes de turbidez del cielo (β), desde cielo despejado hasta un cielo turbio.

En primera instancia, a partir de los datos históricos de temperatura y humedad relativa del aire, la latitud y elevación del lugar, los días julianos y horas en los que se tomaron los datos, se estimaron las variables clave para el cálculo de cada una de las transmitancias, tales como: la altitud solar (A), la declinación solar (δ), la constante solar correspondiente (CR), la masa del aire (MA), masa relativa del aire ($MREL$), camino óptico relativo del ozono (U_o), profundidad óptica del agua precipitable (U_w), agua precipitable (WW) y la dispersión por scattering (FC).

2.3. Tercera etapa: comparación y verificación del modelo

Para validar la aplicabilidad del modelo bajo las condiciones de la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana, se compararon las estimaciones de éste, con los datos obtenidos por los piranómetros para el mismo periodo en su respectiva estación, y con estimaciones conseguidas a partir del modelo de Angström-Prescott que es el modelo utilizado en la actualidad por el IDEAM, mediante un procedimiento de regresión lineal, en el que se igualan las estimaciones con las medidas y se analiza la dispersión de los datos y la magnitud del coeficiente que acompañaría la variable independiente (para este análisis esta será la radiación estimada con el modelo). Esto permitirá determinar si hay o no diferencias significativas entre las medidas y las estimaciones de los modelos.

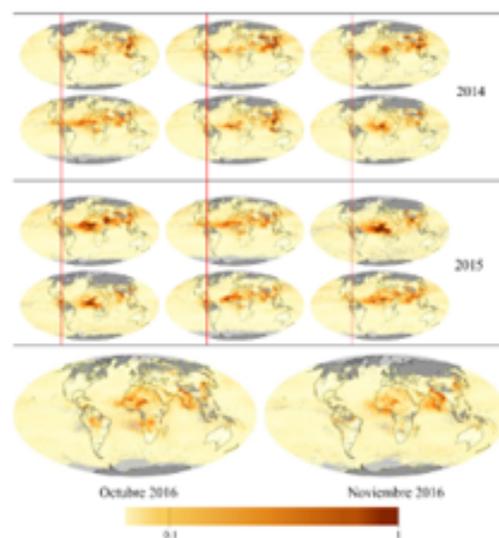
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación de la constante de turbidez

Uno de los obstáculos a la hora de realizar estimaciones con el modelo de Bird y Hulstrom es el cálculo de la constante de turbidez, ya que este es el único parámetro no cuantitativo del modelo. Como se ha mencionado con anterioridad esta constante se puede estimar de acuerdo con la clasificación que hace el Global Learning and Observations to Benefit the Environment[9].

Aunque la estimación de la constante de turbidez del cielo es de carácter cualitativo, existen varias herramientas que reducen el margen de error de la estimación, una de estas son los mapas de profundidad óptica de aerosoles. Existe una fuerte relación entre el tipo de atmósfera y la profundidad óptica de aerosoles[5]. La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) lleva un control de dicho parámetro, realizando mapas que muestran cantidades promedio mensuales de aerosoles en todo el mundo con base en las observaciones del Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) en el satélite **Terra** de la NASA[10]. Las mediciones satelitales de aerosoles, llamadas espesores ópticos en aerosol, se basan en el hecho de que las partículas cambian la forma en que la atmósfera refleja y absorbe la luz visible e infrarroja[11] tal como se observa en la Figura 3.1. Un grosor óptico inferior a 0,1 (amarillo más pálido) indica un cielo cristalino con visibilidad máxima, mientras que un valor de 1 (marrón rojizo) indica condiciones muy nebulosas.

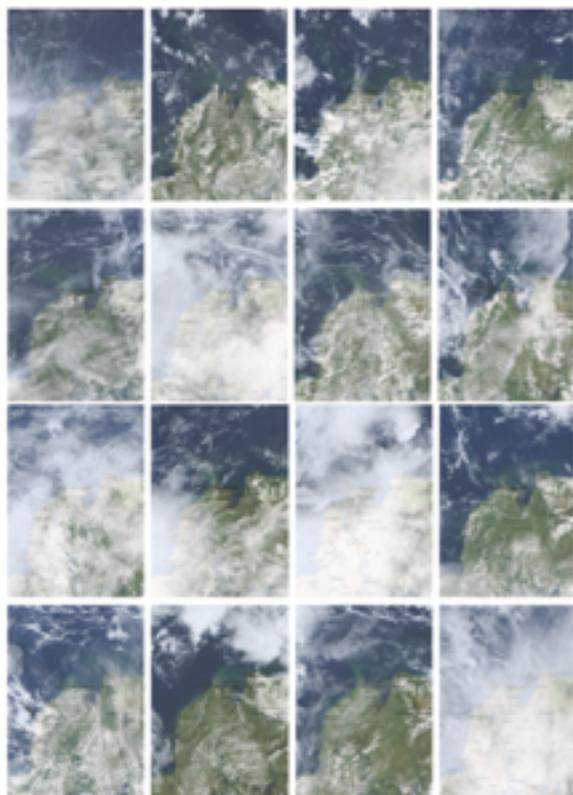
Figura 3.1. Mapa de profundidad óptica de aerosoles por el satélite Terra (MODIS)[10]
Figure 3.1. Optical depth map of aerosols by the Terra satellite (MODIS) [8]



Otra herramienta son las fotos satelitales que nos permiten ver con claridad la formación de nubes y su distribución sobre el área analizada. En las siguientes imágenes se muestran fotografías satelitales suministradas por GLOBE que muestran los fenómenos que hacen referencia a la turbidez atmosférica y que puede estar dada por presencia de aerosoles y/o nubes sobre la costa Atlántica.

Para los meses de octubre y noviembre del 2016 GLOBE registró las fotografías presentadas en la Figura 3.2, las cuales fueron tomadas desde el 25 de octubre del 2016 hasta el 25 de noviembre del mismo año, registradas cada 2 o 3 días.

Figura 3.2. Fotos satelitales cielo de Barranquilla y su área metropolitana, de octubre a noviembre del 2016[12]
Figure 3.2. Sky satellite photos of Barranquilla and its metropolitan area, from October to November 2016[12]



Estas imágenes entran en la descripción de un cielo con constante de turbidez ($0.3 \leq \beta \leq 0.4$). Cielo lechoso con nubosidades[9].

Aún con todo el análisis realizado con anterioridad, de los mapas de profundidad óptica de aerosoles y las fotos satelitales del cielo de Barraquilla, no se puede hacer más que una aproximación del tipo de atmósfera que presenta la ciudad. No se puede establecer con certeza a qué tipo de atmósfera se acomoda mejor el cielo barranquillero, por esto se aplicarán las pruebas de regresión para cada una de las constantes de turbidez hasta encontrar la que genere un mejor ajuste.

3.2. Validación del modelo: Análisis de regresión

3.2.1. Análisis de regresión: Piranómetro vs. Modelo de Angström-Prescott

Como se había mencionado anteriormente, se tomó como estándar de comparación el nivel de similitud que existe entre las medidas y el modelo de Angström-Prescott.

El resumen de estos análisis se recopila en la Tabla 3.1. donde se puede ver el grado de ajuste del modelo con las medidas tomadas directamente a través de los piranómetros.

Tabla 3.1. Regresión simple Piranómetro vs Angström-Prescott
Table 3.1. Simple regression Pyranometer vs Angström-Prescott

Estación	Pendiente (B)	Promedio	R2 (%)	Valor-P
E. Ernesto C	0,946	276,487	99,58	0,00
E. Las Flores	1,035	406,729	99,40	0,00
E. UA	0,954	719,947	96,01	0,00

Las regresiones lineales asociadas al anterior análisis se muestran en las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5.

Figura 3.3 Regresión lineal - Piranómetro vs. Angström-Prescott, Estación Ernesto Cortissoz.

Figure 3.3 Linear regression - Pyranometer vs. Angström-Prescott, Ernesto Cortissoz Station.

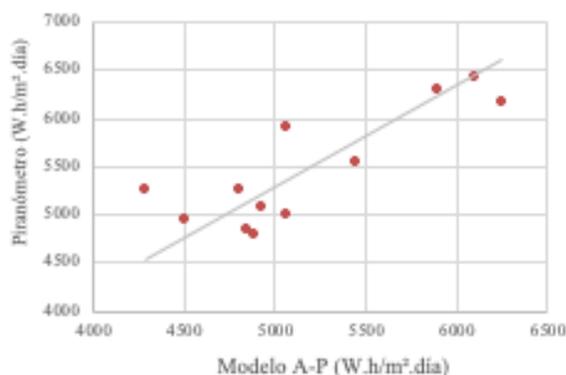


Figura 3.4 Regresión lineal - Piranómetro vs. Angström-Prescott, Estación Las Flores.

Figure 3.4 Linear regression - Pyranometer vs. Angström-Prescott, Las Flores Station.

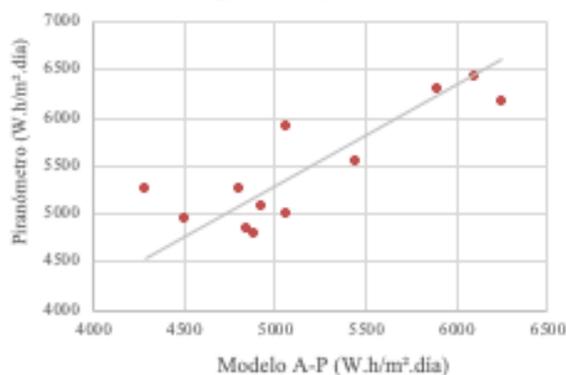
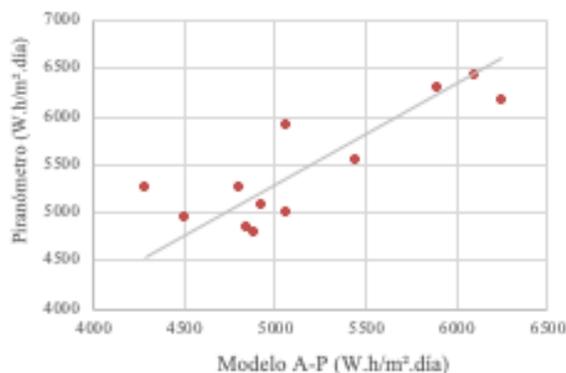


Figura 3.5 Regresión lineal - Piranómetro vs. Angström-Prescott, Estación Universidad del Atlántico.

Figure 3.5 Linear regression - Pyranometer vs. Angström-Prescott, E. Universidad del Atlántico Station.



Como se puede observar en las anteriores figuras, existe un significativo grado de asociación entre las estimaciones a partir del modelo de Angström-Prescott y las medidas de la radiación solar realizadas por los piranómetros. El p-valor de los análisis realizados por el software statgraphics es tan pequeño que tiende a 0 por lo que se puede concluir que las estimaciones del modelo para un 95% de confianza tienen una elevada verosimilitud con la realidad, haciendo que este modelo sea ideal como punto de partida para evaluar el modelo de este estudio.

3.2.2. Análisis de regresión: Piranómetro vs. Modelo de Bird y Hulstrom

Finalmente, para cerrar la tercera etapa de la evaluación se realizaron las regresiones donde se correlacionan las medidas directas de la radiación solar con las estimaciones del modelo de Bird y Hulstrom.

3.2.2.1. Análisis de regresión: Estación Ernesto Cortissoz

Para la estación del aeropuerto Ernesto Cortissoz, los resultados del análisis de regresión se presentan en la tabla 3.2 donde se evidencia que el mejor ajuste de los datos se obtiene para una constante de turbidez de $\beta=0,4$, que está dentro del rango establecido por el análisis cualitativo del tipo de cielo.

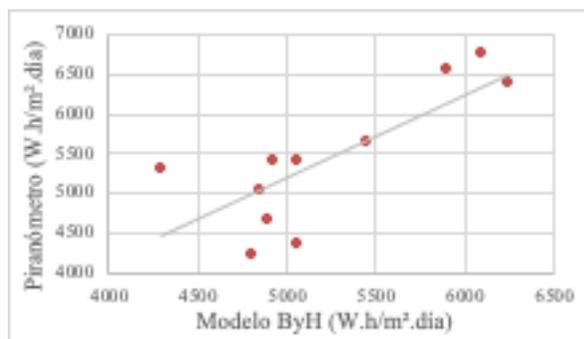
Tabla 3.2 Regresión simple Piranómetro vs Bird y Hulstrom. Estación Ernesto Cortissoz.
Table 3.2 Simple regression Pyranometer vs Bird and Hulstrom. Ernesto Cortissoz Station.

	Pendiente B	Promedio	R ² (%)	Valor-P
ByH(0,0)	0,8565	427,28	99,028	0,0
ByH(0,1)	0,8891	419,56	99,040	0,0
ByH(0,2)	0,9175	414,71	99,046	0,0
ByH(0,3)	0,9421	411,25	99,050	0,0
ByH(0,4)	0,9630	408,88	99,052	0,0

En la Figura 3.6 se presenta la gráfica de regresión obtenida para el mejor ajuste de los datos, es decir $\beta=0,4$.

Figura 3.6 Regresión lineal - Piranómetro vs. Bird y Hulstrom (0,4). Estación Ernesto Cortissoz.

Figure 3.6 Linear regression - Pyranometer vs. Bird and Hulstrom (0.4). Ernesto Cortissoz Station.



3.2.2.2. Análisis de regresión: Estación Las Flores

En la tabla 3.3 se presenta un resumen del análisis de regresión para la estación Las flores, con resultados bastante similares a los obtenidos en la estación Ernesto Cortissoz. Para este caso, la constante de turbidez que mejor ajuste proporciona es $\beta=0,3$ este valor coincide de igual manera con el intervalo determinado cualitativamente.

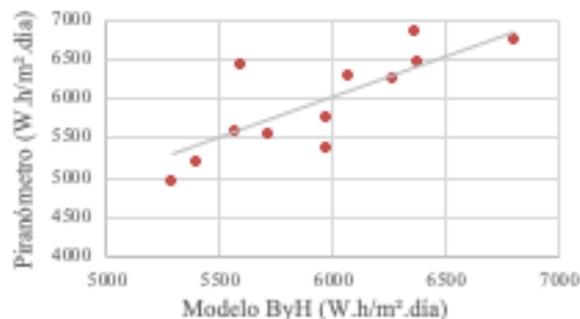
Tabla 3.3 Regresión simple Piranómetro vs Bird y Hulstrom, Estación Las Flores.
Table 3.3 Simple regression Pyranometer vs Bird and Hulstrom, Las Flores Station.

	Pendiente B	Promedio	R ² (%)	Valor-P
ByH(0,0)	0,9056	275,40	99,64	0,0
ByH(0,1)	0,9399	274,59	99,64	0,0
ByH(0,2)	0,9698	274,02	99,64	0,0
ByH(0,3)	0,9955	273,64	99,63	0,0
ByH(0,4)	1,017	273,38	99,63	0,0

En la Figura 3.7 se presenta la gráfica de regresión obtenida para el mejor ajuste de los datos, es decir $\beta=0,3$.

Figura 3.7 Regresión lineal - Piranómetro vs. Bird y Hulstrom (0,3). Estación Las Flores.

Figure 3.7 Linear regression - Pyranometer vs. Bird and Hulstrom (0.3). Las Flores Station



3.2.2.3. Análisis de regresión: Estación Universidad del Atlántico

Finalmente, en la tabla 3.4 se presenta un resumen del análisis de regresión para la estación Universidad del Atlántico. Para este caso la constante de turbidez que mejor ajuste proporciona es $\beta=0,4$ este valor coincide de igual manera a los anteriores con el intervalo determinado cualitativamente.

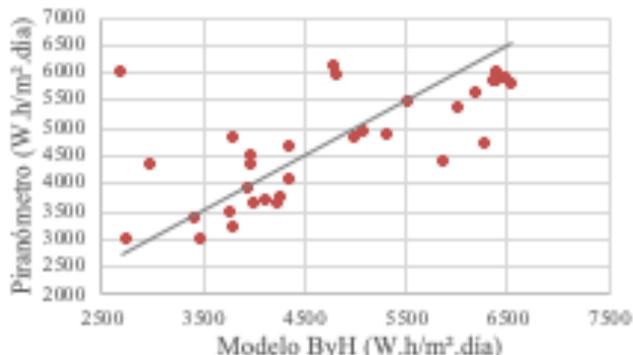
Tabla 3.4 Regresión simple Piranómetro vs Bird y Hulstrom, Estación Universidad del Atlántico.
Table 3.4 Simple regression Pyranometer vs Bird and Hulstrom, Universidad del Atlántico Station.

	Pendiente B	Promedio	R ² (%)	Valor-P
ByH(0,0)	0,8836	658,08	96,46	0,0
ByH(0,1)	0,9207	655,08	96,48	0,0
ByH(0,2)	0,9529	652,89	96,50	0,0
ByH(0,3)	0,9804	651,36	96,52	0,0
ByH(0,4)	1,003	650,33	96,53	0,0

En la Figura 3.8 se presenta la gráfica de regresión obtenida para el mejor ajuste de los datos, es decir $\beta=0,4$.

Figura 3.8 Regresión lineal - Piranómetro vs. Bird y Hulstrom (0,4). Estación Universidad del Atlántico.

Figure 3.8 Linear regression - Pyranometer vs. Bird and Hulstrom (0.4). Universidad del Atlántico Station.



Los resultados de los análisis realizados anteriormente se pueden observar de manera gráfica en las siguientes figuras: en la Figura 3.9 se muestran los comportamientos de las predicciones por ambos modelos de forma paralela a los datos obtenidos de manera directa por los piranómetros para las estaciones Ernesto Cortissoz y Las Flores. La Figura 3.10 presenta la misma información, pero para la estación Universidad del Atlántico.

Figura 3.9 Bird y Hulstrom, Angström-Prescott y Piranómetro estaciones las Flores y Ernesto Cortissoz.

Figure 3.9 Bird and Hulstrom, Angström-Prescott and Piranometer las Flores and Ernesto Cortissoz Stations.

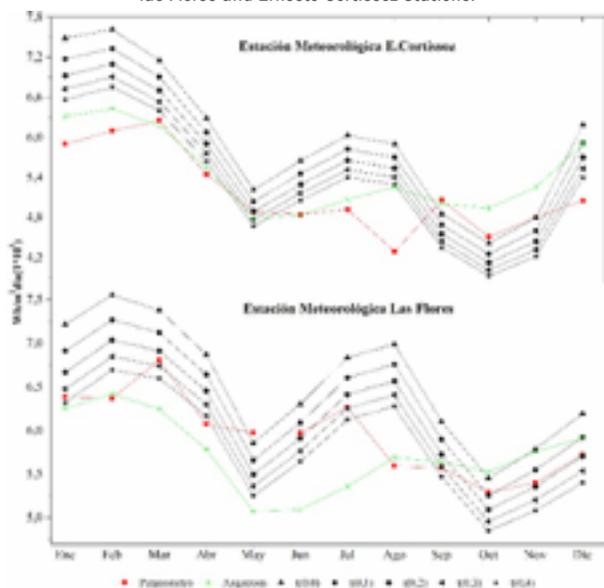
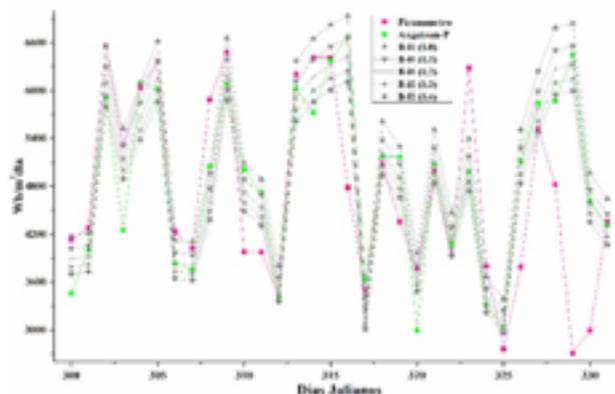


Figura 3.10 Bird y Hulstrom, Angström-Prescott y Piranómetro estación Universidad del Atlántico.

Figure 3.10 Bird and Hulstrom, Angström-Prescott and Piranometer station Atlantic University.



De las anteriores figuras se pueden sacar las siguientes conclusiones: que Bird y Hulstrom tienen una tendencia con mayor grado de ajuste que Ångström y Prescott y que los valores de mayor turbidez ($0.3 \leq \beta \leq 0.4$) son los que mejores estimaciones proporcionan, pero además de esto, en la Figura 3.9 también se puede observar como ambos modelos tienden a ser menos consistentes o precisos en meses como julio y agosto. Se maneja la hipótesis de que esto podría deberse a la influencia de un factor que no es analizado ni mucho menos tenido en cuenta en ninguno de los modelos presentados, y se trata de la velocidad del viento, que es alta en estos meses y cambia significativamente las condiciones atmosféricas de la zona analizada.

Además de lo anterior, comparando los coeficientes de correlación para cada uno de los modelos frente a los datos medidos con el Piranómetro en cada una de las estaciones, así como las respectivas pendientes, la estimación con mayor verosimilitud fue la obtenida con el modelo de Bird y Hulstrom, pero no de manera sobresaliente. Es innegable que los factores de correlación obtenidos con el modelo de Angström-Prescott indican un buen ajuste a la realidad, aun cuando el modelo de Bird y Hulstrom representan una moderada mejora en los ajustes (apenas superior al 2%), la complejidad del mismo frente al modelo de Angström que es mucho más práctico, hacen que una ganancia del 2% en el ajuste no parezca razón suficiente para utilizar un modelo más complejo y robusto.

No obstante, cabe resaltar que aparte de la constante de turbidez todos los demás factores del modelo de Bird y Hulstrom se pueden calcular a partir de variables medibles, lo que le da una versatilidad y aplicabilidad que no discrimina de geolocalización o condiciones meteorológicas, esto no se puede decir del modelo de Angström-Prescott donde los coeficientes de regresión a y b varían según la región del planeta donde se vaya a aplicar y sus condiciones climatológicas, por lo que existen diversas formas de estimarlos desarrolladas por distintos autores.

Por otra parte, se puede observar que las constantes de turbidez que mejor ajuste proporcionaron están dentro de los intervalos establecidos por el análisis de carácter cualitativo que se realizó a partir del mapa de profundidad óptica de aerosoles de la NASA y las fotografías satelitales proporcionadas por GLOBE, lo que indica que la atmosfera típica de la ciudad tiene un carácter turbio, algo de efecto calima, smog y muchas nubes, lo que no se traduce necesariamente en que la radiación solar incidente sobre la ciudad sea baja, pues con un intervalo entre 5,0 - 5,5kWh/m² es una de las más altas del país, simplemente indica que para dicha geolocalización y condiciones no se tiene la máxima incidencia alcanzable que puede llegar a los 6kWh/m² en algunos lugares del país.

Finalmente se pueden resumir los resultados en un par de tablas, donde se muestran las mejores pendientes y los mejores coeficientes de correlación obtenidos de las regresiones, estos resúmenes se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 3.3. Resumen de los resultados, mejores pendientes obtenidas de la regresión.

Table 3.3. Summary of the results, better slopes obtained from the regression.

ESTACIÓN	PENDIENTE		
	β (ByH)	ByH	A-P
Ernesto Cortissoz	(0,4)	0,963048	0,946318
Las Flores	(0,3)	0,995596	1,035730
Universidad del Atlántico	(0,4)	1,003730	0,979862

Tabla 3.4. Resumen de los resultados, mejores coeficientes de correlación obtenidos de la regresión.

Table 3.4. Summary of the results, better correlation coefficients obtained from the regression.

MODELO	Coefficiente de Correlación
Bird y Hulstrom	0,9981
Angström-PreScott	0,9970

4. CONCLUSIONES

4.1. Validación del modelo: Análisis de regresión

En resumen, se puede concluir:

- El modelo de Bird y Hulstrom puede ser una herramienta excelente a la hora de estimar la radiación solar incidente en cualquier lugar de la ciudad, riguroso y con solo un parámetro cualitativo.

- A pesar de las buenas estimaciones del modelo de Bird y Hulstrom para efectos prácticos modelos como el de Angström-PreScott representan una opción menos complicada y con el sello de confianza del IDEAM, todo dependerá del nivel de rigurosidad que se desee.

- El cielo de la ciudad de Barranquilla se ajusta a una constante de turbidez elevada ($0.3 \leq \beta \leq 0.4$) pero esto no implica que la radiación incidente sea baja, de hecho, es de las más altas del país con un intervalo que se mueve entre 5,25kWh/m² y 6,8kWh/m² a lo largo del año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. E. Fowle and F. E., "The Transparency of Aqueous Vapor," *Astrophys. J.*, vol. 42, p. 394, Dec. 1915.
- [2] H. C. Hottel, "A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres," *Sol. Energy*, vol. 18, no. 2, pp. 129–134, 1976.
- [3] R. E. Bird and R. L. Hulstrom, "Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces." 1981.
- [4] R. C. Srivastava and H. Pandey, "Estimating Angstrom-PreScott Coefficients for India and Developing a Correlation between Sunshine Hours and Global Solar Radiation for India," *ISRN Renew. Energy*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–7, 2013.
- [5] V. O. Eunice, "Método de evaluación de la radiación solar por transmisibilidad atmosférica. Aplicación a la determinación del potencial energético solar de México," 2012.
- [6] M. a. Atwater and T. J. Ball, "A surface solar radiation model for cloudy atmospheres.pdf," *Monthly weather review*, vol. 109, no. 4. pp. 878–888, 1981.
- [7] J. Quereda Sala, *Curso de climatología general*. Universitat Jaume I, 2005.
- [8] I. Rahimi, B. Bakhtiari, K. Qaderi, and M. Aghababaie, "Calibration of angstrom equation for estimating solar radiation using Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm (Case study: Mashhad-east of Iran)," *Energy Procedia*, vol. 18, no. 1, pp. 644–651, 2012.
- [9] The Global Learning and Observations to Benefit the Environment, "GLOBE Home Page - GLOBE.gov." [Online]. Available: <https://www.globe.gov/es/home>. [Accessed: 19-Apr-2018].
- [10] Administration National Aeronautics and Space, "Aerosol Optical Depth : Global Maps," 19-Apr-2018. [Online]. Available: https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MODAL2_M_AER_OD. [Accessed: 19-Apr-2018].
- [11] J. E. Figueruelo and M. Marino Dávila, *Química física del ambiente de los procesos medioambientales*. Editorial Reverté, 2004.
- [12] Global Learning and Observations to Benefit the Environment, "GLOBE Science Data Visualization." [Online]. Available: <https://vis.globe.gov/GLOBE/>. [Accessed: 19-Apr-2018].