

Application of the Light Sky BIRD Model for the Calculation of Global Solar Irradiance (Direct and Diffuse) in Tegucigalpa, Honduras

Carlos Luis Oyuela Gómez, Master en Energía Renovable¹,
Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Honduras, carlos.oyuela@unitec.edu

Abstract– This academic research contribution focused on the application of a calculation methodology, has the objective of applying a theoretical model of global irradiance (direct and diffuse) and in turn determining a consistent data irradiance maps for the city of Tegucigalpa, Honduras. This document results from a series of contributions determined by the location of the site (polygon defined for the study area) and references from national and international institutions dedicated to the analysis of the solar resource. This study is based on the Bird model for Clear Sky, values and graphs that will be adequate and convenient for future solar radiation analysis in photovoltaic and solar thermal projects or comparison of theoretical data with data measured in real time through measuring instruments of the solar resource.

Keywords: Bird Model, Direct, Diffuse, Global Irradiance.

Digital Object Identifier (DOI): http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.543 ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390
--

Aplicación del Modelo de Bird de Cielo Claro para el Cálculo de la Irradiancia Solar Global (Directa y Difusa) en Tegucigalpa, Honduras

Application of the Clear Sky Bird Model for the Calculation of Global Solar Irradiance (Direct and Diffuse) in Tegucigalpa, Honduras

Carlos Luis Oyuela Gómez, Master en Energía Renovable¹,
Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Honduras, carlos.oyuela@unitec.edu

Esta aportación académica de investigación enfocada en la aplicación de una metodología de cálculo, tiene el objetivo de aplicar un modelo teórico de irradiancia global (directa y difusa) y a su vez determinar mapas de irradiancia de datos consistentes en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. Este documento resulta de una serie de aportaciones determinadas por la ubicación del sitio y referencias de instituciones nacionales e internacionales dedicadas al análisis del recurso solar. Este estudio se realizó en base a las investigaciones de Richard E. Bird y Roland L. Hulstrom en su modelo de Cielo Claro, valores y graficas que serán adecuados y convenientes para futuros análisis de radiación solar en proyectos fotovoltaicos y termo solares o comparación de datos teóricos con datos medidos en tiempo real a través de instrumentos de medición del recurso solar.

Palabras Claves -- Modelo de Bird de Cielo Claro, Direct, Difusa, Irradiancia Solar Global.

This academic contribution of research focused on the application of a calculation methodology, has the objective of applying a theoretical model of global irradiance (direct and diffuse) and in turn determining irradiance maps of consistent data in the city of Tegucigalpa, Honduras. This document results from a series of contributions determined by the location of the site and references from national and international institutions dedicated to the analysis of the solar resource. This study was carried out based on the investigations of Richard E. Bird and Roland L. Hulstrom in their Clear Sky model, values and graphs that will be adequate and convenient for future analysis of solar radiation in photovoltaic and thermo-solar projects or data comparison Theorists with data measured in real time through solar resource measurement instruments.

Keywords: Clear Sky Bird Model, Direct, Diffuse, Global Solar Irradiance.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y los problemas medioambientales que nuestro planeta sufre en la actualidad afectan drásticamente las interacciones de los procesos naturales, económicos y sociales. Como consecuencia de estos efectos los reglamentos, normativas y políticas nacionales e internacionales deben presentar una actualización en la forma de

consumir los recursos energéticos con el objetivo de garantizar la sostenibilidad a futuras generaciones, controlar el cambio climático, disminuyendo la producción de gases de efecto invernadero.

En términos específicos lograr una sostenibilidad en donde la capacidad de atender nuestras necesidades actuales no comprometa la capacidad de futuras generaciones de atender sus propias necesidades. (Bruntland, 1987).

Los cambios en el medio ambiente, altos costos de petróleo, excesivo consumo de energía, entre otras, traen consigo presiones a los sistemas energéticos, eficiencia energética en las áreas productivas de cada comunidad, es necesario el desarrollo de estudios que describan la situación actual, proyección energética y diseño de normativas y políticas públicas. En su conjunto, estos estudios y análisis permiten a las entidades nacionales, tomar decisiones oportunas y dirigidas hacia un objetivo común: desarrollar, mejorar y optimizar el sector energético de Honduras (Energía, 2018).

El escenario actual de precios de petróleo y energías fósiles es una oportunidad para corregir las distorsiones que existen en el actual sistema energético del país, la cual se compone de una matriz energética diversa en tecnologías renovables (Empresa Nacional de Energía Eléctrica, 2019) y preparar el camino hacia una transición de un sistema energético más estable y sostenible con el tiempo.

Esta investigación académica se centra en la creación de una base de datos teórica y gráficos que caractericen el recurso solar actual, a través del Modelo de Bird de Cielo Claro, para determinar el potencial de irradiancia en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras; con el fin de obtener una primera referencia de valores de irradiancia solar global teórica como punto de partida para futuros análisis y evaluaciones.

Según la plataforma NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, 2020), la ciudad de Tegucigalpa tiene un nivel promedio de radiación solar a cielo claro de 6.54 kWh/m²/día. El elevado potencial de energía de acuerdo a su recurso solar, hace a la ciudad un candidato excelente para la generación de proyectos fotovoltaicos.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.545>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

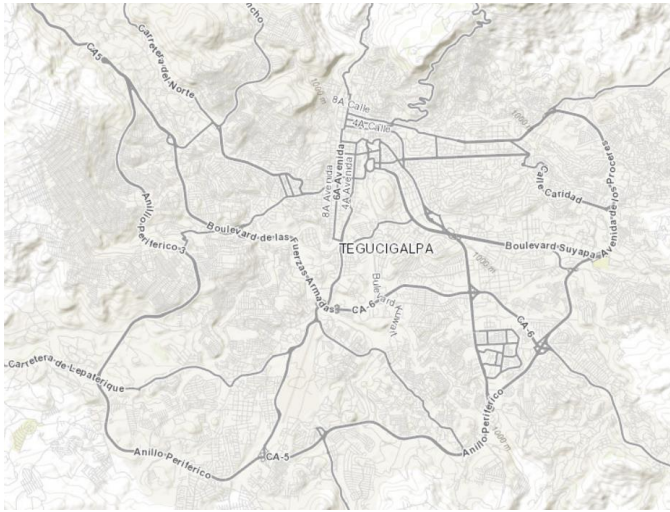


Fig. 1 Plano del relieve de la ciudad de Tegucigalpa.

II. MARCO TEÓRICO

Según las investigaciones que Richard E. Bird y Roland L. Hulstrom (1981), realizaron para el “Solar Energy Research Institute, SERI” (A Division of Midwest Research Institute), actualmente es la “National Renewable Energy Laboratory, NREL” es una investigación y modelo a partir de la consideración de una serie de modelos de irradiancia directa normal para un día claro llamado “A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces”. Combinando los resultados proporcionados por el pseudo código SOLTRAN 3, SOLTRAN 4 para irradiancia directa (Richard E. Bird, Direct Insolation Model, 1980) y el modelo BRITTE Monte Carlo Global (Richard E. Bird, Application of Monte Carlo Techniques to Insolation Characterization and Prediction, 1979) en aquel momento, con distintas ecuaciones se obtuvieron las expresiones de transmitancias y absorptancias atmosféricas. La ecuación fundamental según (Richard E. Bird, A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces, 1981) es la siguiente:

$$I_d = I_o(\cos Z)(0.9662)T_R T_O T_{UM} T_W T_A \quad (1)$$

III. METODOLOGÍA

La evaluación y análisis de la aplicación de un Modelo de Irradiancia para Cielo Claro se originó por la necesidad de contar con una primera referencia del potencial del recurso solar presente en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. Inicialmente se realizó el análisis del área de estudio, luego la aplicación o adopción del Modelo de Bird para Cielo Claro, obtención y organización de los datos iniciales que fue producto de investigación bibliográfica a través de organismos nacionales e internacionales para la adaptación al modelo propuesto, finalmente se calcularon los parámetros que permiten obtener los valores de Irradiancia Solar Global

(Directa y Difusa) Teórica a Cielo Claro de la zona en estudio, el termino a Cielo Claro significa, que no toma en consideración los efectos de reflexión solar (irradiancia solar reflejada) y tampoco se encuentra el efecto de nubosidad o índice de claridad (k), debido a que los efectos climáticos son diversos ante la posibilidad de una atmosfera con características complejas.

A. Área de Estudio

Para el estudio se tomó como eje central de esta investigación la ciudad de Tegucigalpa, debido a que cuenta con una estación meteorológica de monitoreo y captación de datos bastante importante (Estación Toncontin) y que es la Capital de la República de Honduras. El área de influencia de este análisis y evaluación se determinó con el fin de abarcar en su totalidad la ciudad, estableciendo un polígono característico delimitado por coordenadas. Los puntos geográficos delimitados son los siguientes:

1. 14.130° Latitud, -87.268° Longitud, WGS-84 / Comunidad El Durazno.
2. 14.130° Latitud, -87.138° Longitud, WGS-84 / Comunidad El Chimbo.
3. 14.025° Latitud, -87.138° Longitud, WGS-84 / Comunidad Villa Nueva.
4. 14.025° Latitud, -87.268° Longitud, WGS-84 / Comunidad La Poza.

Esta zona corresponde al Municipio del Distrito Central, departamento de Francisco Morazán, el polígono de influencia de estudio tiene un área de cobertura de 162.97 km², que representa el 0.145% del territorio nacional.

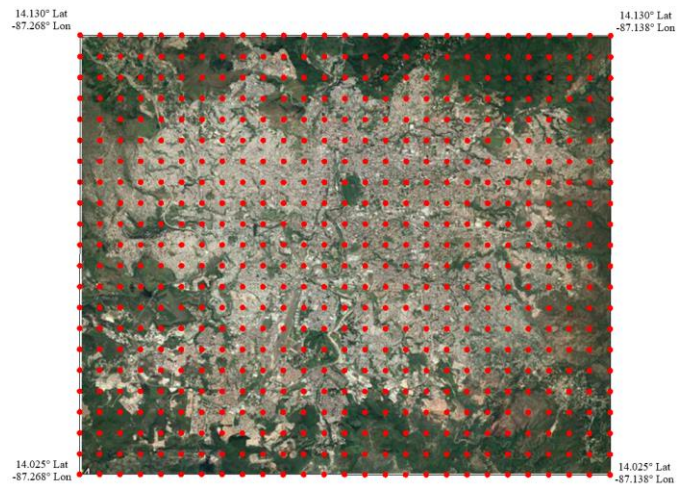


Fig. 1 Delimitación de zona de estudio.

B. Análisis de la Información

A través de la herramienta de software Microsoft Excel® se formuló un código en el que se realizó el análisis, calculo e interpretación de la información y se complementaron mediante una simplificación matemática en diferentes series de tiempo; para una mejor comprensión se debe observar el

diagrama siguiente. La diagramación del proceso realizado fue necesaria ya que se tomaron en consideración una cantidad considerable de puntos de medición teóricos en la zona, con el objeto de establecer una precisión aceptable para este estudio. En total se obtuvieron 594 puntos de medición teóricos para la elaboración de los mapas o esquemas de irradiancias objeto de este análisis, con 9 puntos base para elaboración de gráficas de irradiancia global (directa y difusa) promedio diario.

C. Elaboración de Mapas y Gráficos

Concluido el análisis, cálculos e interpretación de los resultados de la irradiancia global (directa y difusa) para todos los puntos de medición (594) y puntos base (9) y utilizando el código construido en base al modelo de Bird para cielo claro (Richard E. Bird, A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces, 1981), se continuo con la elaboración de los mapas y gráficos de irradiancia por medio del software MS Excel®, para visualizar las franjas de potencial del recurso solar en el área de estudio.

De acuerdo a las condiciones climáticas del sitio en análisis se han determinado los siguientes parámetros de entrada para la construcción del modelo de Cielo Claro adoptado.

1. Huso Horario [-] -6
2. Presión Atmosférica [mBar] (SERVIR, 2019) 1016
3. Ozono Atmosférico [cm] (Fleming, 2018) 0.35
4. Vapor de Agua [H₂O, ppmv] 4.25
5. Profundidad Óptica de Aerosol @500nm (NASA, 2019) 0.222
6. Profundidad Óptica de Aerosol @380nm 0.333
7. Factor Asimétrico [-] 0.85
8. Albedo en Superficie [-] 0.20
9. Constante Solar [W/m²] (Elaboración Propia) 1367.90

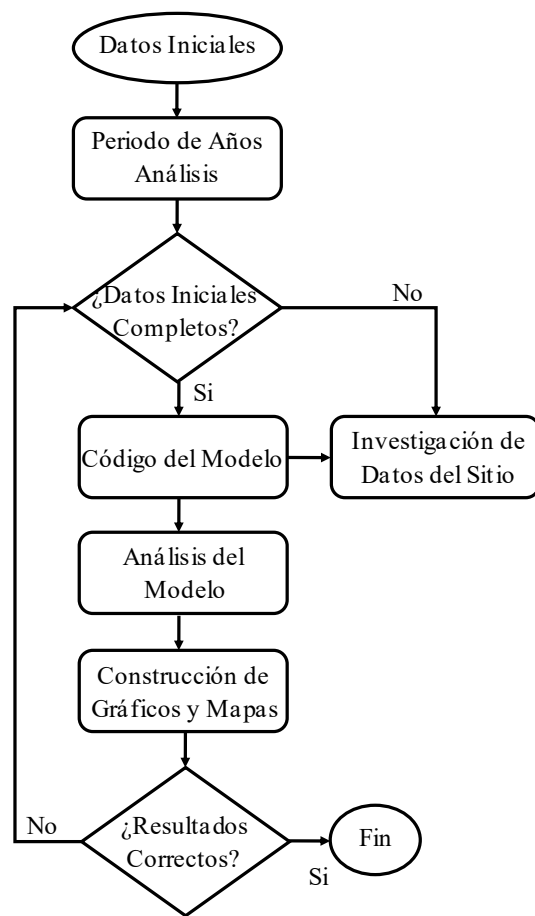


Fig. 2 Diagrama de Proceso para Cálculo de Irradiancias.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis y Elaboración de Gráficos de Irradiancia Global Promedio Diario

De acuerdo al modelo de Bird de Cielo Claro adoptado para este estudio se obtuvieron datos de irradiancia para cada uno de los puntos de medición determinado en el área de estudio, con estos resultados se determina el aporte por cada tipo de irradiancia (directa y difusa), el análisis detallado según el modelo se realiza para una atmosfera en condiciones de cielo claro, con una turbiedad por las condiciones naturales de la misma, pero sin el efecto climatológico, en este sentido no se toma en consideración el coeficiente de nubosidad o índice de claridad (k) presente en muchos de los días del año.

Teniendo en consideración estos datos, se procedió a calcular las irradiancias globales (directa y difusa) de forma promedio mensual para un día característico, cada valor está determinado en unidades de W/m². Luego de realizar el análisis correspondiente del modelo, el grafico de datos mensuales promedio para cada una de las horas del día es el siguiente:

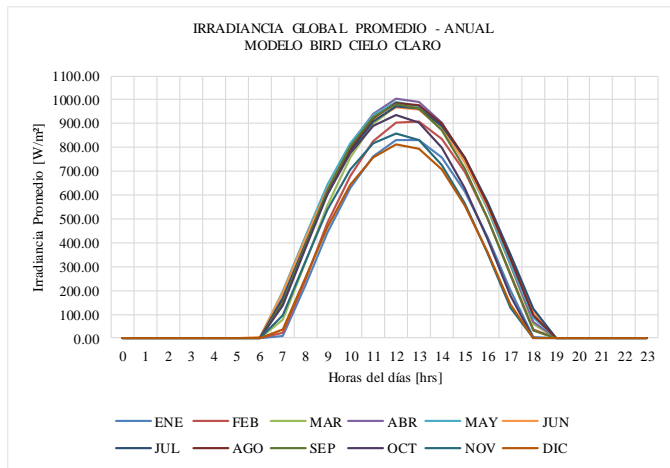


Fig. 3 Irradiancias globales promedio mensual para un año característico

B. Elaboración de Mapas de Irradiancia Global Promedio

1. Irradiancia Solar Directa

De acuerdo a la naturaleza del modelo aplicado para el área de estudio, los cálculos interpretados presentan un patrón similar de acuerdo a las características de la atmosfera considerada, debido a las condiciones climáticas de la zona tropical analizada.

En el siguiente grafico se muestran los datos de irradiancia directa en la zona de estudio para todos los días del año característico. Los mayores valores de irradiancia se presentan en los meses de marzo, abril, agosto y septiembre. De forma general se muestra un patrón uniforme en el comportamiento de todos los puntos de medición.

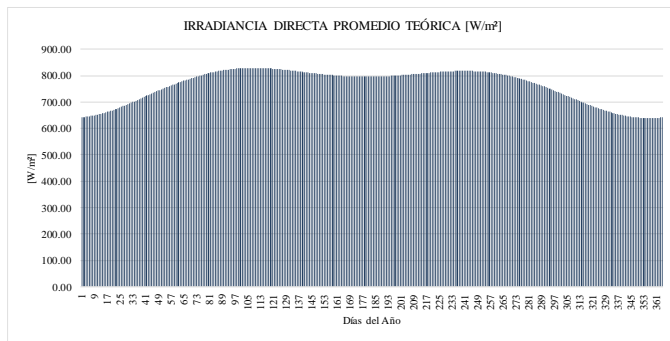


Fig. 4 Irradiancias directas promedio diarias para un año característico

2. Irradiancia Solar Difusa

El cálculo de la irradiancia solar difusa teórica se modela a partir de la presencia de aerosoles, partículas de polvo, moléculas de aire. Este cálculo se realizó para un tipo de atmosfera característico para el área en estudio y de igual forma que la irradiancia directa. (Chamorro, 2017).

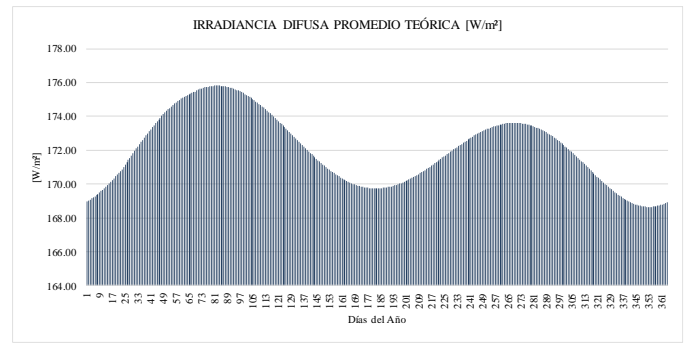


Fig. 5 Irradiancias difusas promedio diarias para un año característico

3. Irradiancia Solar Global (Directa y Difusa)

La sumatoria de la irradiancia directa y difusa es la irradiancia solar total, considerando el total de las condiciones de turbiedad de atmosfera, partículas de polvo, moléculas de aires y cielo claro de la atmosfera.

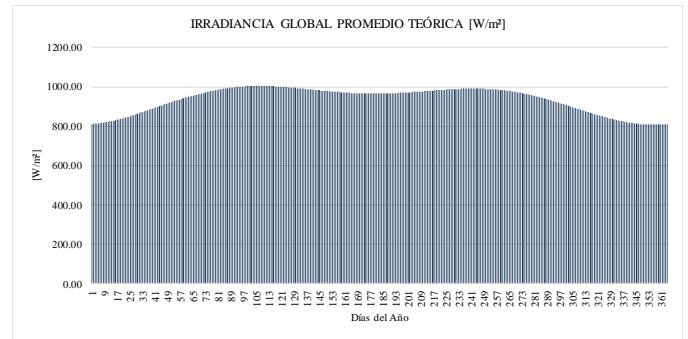


Fig. 6 Irradiancias globales promedio diarias para un año característico

El proceso de discretización de datos e interpretación de los resultados para la creación de los mapas de irradiancia se ha realizado para tres periodos en el año, de acuerdo a los rangos de valores resultantes, tomando valores promedio diarios de cada uno de los puntos de medición determinados en el área de influencia.

Los periodos de análisis son los siguientes:

1. Enero – Abril [928.00 – 929.50 W/m²]
2. Mayo – Agosto [978.40 – 979.20 W/m²]
3. Septiembre – Diciembre [896.00 – 897.50 W/m²]

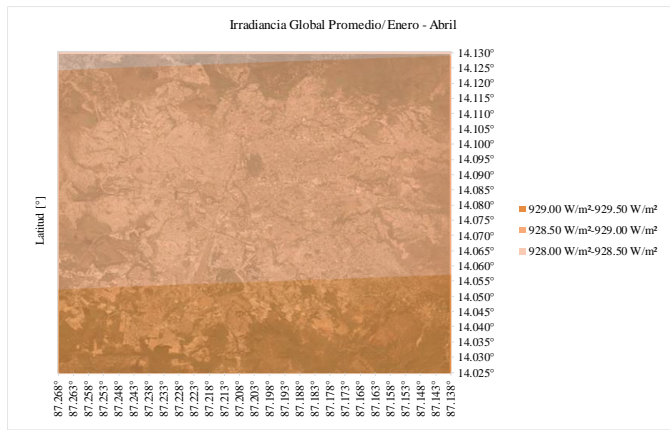


Fig. 7 Mapa de Irradiancia global promedio de enero-abril

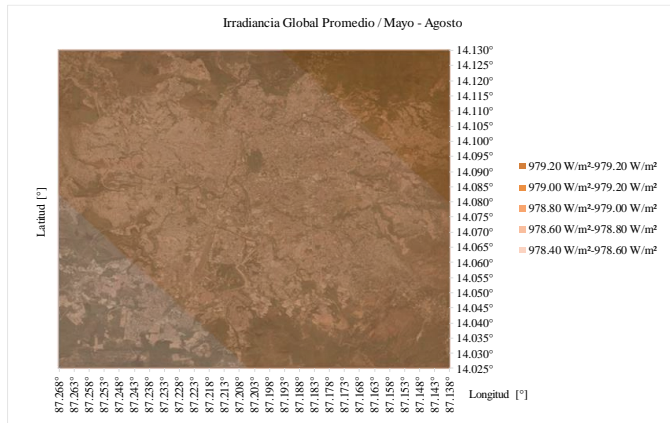


Fig. 8 Mapa de Irradiancia global promedio de mayo-agosto

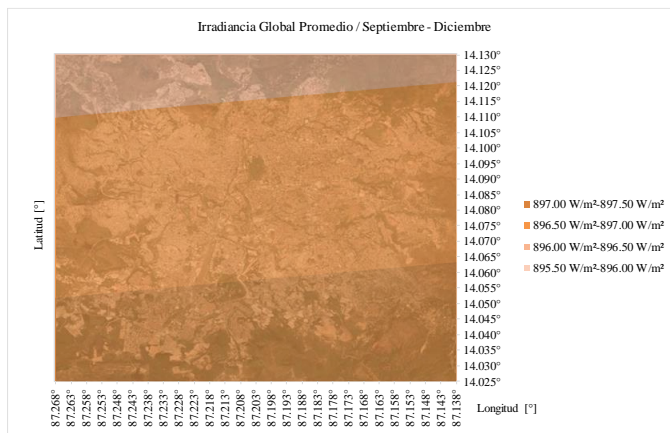


Fig. 9 Mapa de Irradiancia global promedio de septiembre-diciembre

V. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo comprende una parte de análisis y aplicación del modelo para obtener los correspondientes valores de irradiancia global, pero este apartado se centra en la verificación de los datos obtenidos en el área de estudio a través del Modelo de Bird para Cielo Claro, los datos calculados se compararon con los datos de la Estación

Meteorológica de Toncontin, ubicada en la ciudad de Tegucigalpa, con el objetivo de conocer la cantidad de horas de sol promedio mensual en la zona, también fue necesario la utilización del motor de datos de La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, 2019) para la zona, en su interface de Cielo Claro.

En la verificación del modelo es de esperarse que se presente un margen de error entre los resultados obtenidos por el modelo aplicado y por los valores obtenido por Estación Meteorológica y datos de NASA, considerándose como una fuente de información confiable.

La estadística de datos considerada para esta validación tiene los siguientes periodos de duración:

1. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources = Clear Sky, años 2000 – 2007.
2. Estación Toncontin, Sistema Meteorológico Nacional = Horas Promedio Mensual, años 1970 – 2004.

Tabla I
RESULTADOS DE VERIFICACIÓN

Mes	Radiación Solar [kWh/m²]	Horas de Sol [hrs]	Irrad. Bird [W/m²]	Irrad. Est. Met. [W/m²]	Dif. [%]
Ene	5.78	7.2	833.69	802.86	3.84%
Feb	6.36	8.09	907.09	785.98	15.41%
Mar	6.99	8.59	973.92	814.11	19.63%
Abr	7.05	7.9	1002.44	891.77	12.41%
May	7.01	6.83	989.10	1026.53	3.78%
Jun	7.00	6.13	969.29	1142.28	17.85%
Jul	6.93	6.24	970.61	1110.25	14.39%
Ago	6.87	6.68	986.33	1028.41	4.27%
Sep	6.78	6.18	982.74	1097.07	11.63%
Oct	6.29	6.28	934.92	1001.25	7.09%
Nov	5.88	6.57	860.4	894.26	3.94%
Dic	5.53	6.55	812.84	844.01	3.84%

Los valores de horas mensuales obtenidos para la validación de los cálculos de irradiancia global, probablemente contengan los efectos de nubosidad y contaminación presente en la atmosfera turbia, ya que son datos tomados en tierra por extensos periodos, por tal razón los resultados de irradiancia global según datos de estación meteorológica tienen una diferencia máxima de 19.63%, con un promedio global de 9.84%, el cual se considera un valor aceptable para el análisis presentado.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación del Modelo de Cielo Abierto de Bird (Clear Sky Model Bird) en el área de estudio para la ciudad de Tegucigalpa determino el análisis y validación del recurso solar en cuanto a Irradiancia Global del sitio. Las estimaciones realizadas lograron determinar que los meses de mayor

incidencia de irradiancia solar se encuentran desde abril hasta agosto con valores relativamente constantes en este periodo.

Se concluyó que en promedio el 81.61% corresponde a la Irradiancia Directa y un 18.39% se estima para la Irradiancia Difusa. De forma global los valores presentados en este documento, son factibles para el desarrollo de proyectos con tecnología fotovoltaica y tecnología termo solar para Agua Caliente Sanitaria.

Una recomendación para análisis y estimaciones de recurso solar futuros, es que se necesita fomentar la investigación académica y desarrollo de estadísticas para toma de datos de campo en tiempo real a través de equipo especializado, con el objetivo de obtener valores confiables que aseguren la realización de los análisis.

La validación de la investigación tiene una diferencia máxima de 19.63%, con un promedio global de 9.84%, el cual se considera un valor aceptable para el análisis presentado.

VI. AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, especialmente a la carrera de Ingeniería en Energía, por potenciar e impulsar este tipo de proyectos que contribuyen al desarrollo de la investigación en Honduras.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bruntland, C. (1987). Londres.
2. Chamorro, M. V. (2017). Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia). *Espacios*, 18.
3. Council, U. G. (2017). Políticas para promover la eficiencia energética utilizando la Certificación de Superación de Código para Edificios del sector privado. *Building Efficiency Accelerator*, 2.
4. Empresa Nacional de Energía Eléctrica, E. (2019). *Boletín de Datos Estadísticos Marzo 2019*. Tegucigalpa: Gerencia de Planificación, Cambio e Innovación Empresarial.
5. Energía, S. d. (2018). *Balance Energético Nacional 2017*. Tegucigalpa: Secretaría de Energía.
6. Fleming, Z. L. (2018). Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day ozone distribution and trends relevant to human health. *ELEMENTA Science of the Anthropocene*, 41.
7. NASA. (Agosto de 2019). *AERONET - Aerosol Robotic Network*. Obtenido de www.aeronet.gsfc.nasa.gov
8. NASA. (Agosto de 2019). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
9. Richard E. Bird, R. L. (1979). *Application of Monte Carlo Techniques to Insolation Characterization and Prediction*. Golde, Colorado: Solar Energy Research Institute.
10. Richard E. Bird, R. L. (1980). *Direct Insolation Model*. Golden, Colocado: Solar Energy Research Institute.
11. Richard E. Bird, R. L. (1981). *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*. Golden, Colorado 80401: Solar Energy Research Institute.
12. SERVIR. (Julio de 2019). *Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica*. Obtenido de Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica: www.servir.net
13. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. (25 de febrero de 2020). *NASA POWER*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/>