



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

Análisis y Comparación de la Irradiación Solar de Diferentes Bases Meteorológicas con Fines de Generación de Electricidad.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: JEAN CARLOS MINA CASTILLO JAMILLE
ELIZABETH VILLAMAR OLVERA

TUTOR: ING. JUAN CARLOS LATA GARCIA, MSC

Guayaquil-Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jean Carlos Mina Castillo con documento de identificación N.º 0926547761 y Jamille Elizabeth Villamar Olvera con documento de identificación N.º 0919584763 manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y. autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,



Jamille Elizabeth Villamar Olvera

0919584763



Jean Carlos Mina Castillo

0926547761

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jean Carlos Mina Castillo con documento de identificación N.º 0926547761, y Jamille Elizabeth Villamar Olvera con documento de identificación N.º 0919584763, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Análisis y Comparación de la Irradiación Solar de Diferentes Bases Meteorológicas con Fines de Generación de Electricidad”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,



Jamille Elizabeth Villamar Olvera

0919584763



Jean Carlos Mina Castillo

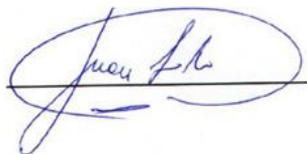
0926547761

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Carlos Lata García con documento de identificación N.º 0301791893, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR DE DIFERENTES BASES METEOROLÓGICAS CON FINES DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**, realizado por Jean Carlos Mina Castillo con documento de identificación N.º 0926547761, y por Jamille Elizabeth Villamar Olvera con documento de identificación N.º 0919584763, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de marzo del año 2024

Atentamente,



Phd. Juan Carlos Lata Garcia, Msc

0301791893

Análisis y Comparación de la Irradiación Solar^y de Diferentes Bases Meteorológicas con Fines de Generación de Electricidad.

Jean Carlos Mina Castillo
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador
jminac@est.ups.edu.ec

Jamille Elizabeth Villamar O.
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador
jvillamaro1@est.ups.edu.ec

Juan Lata-Garcia
Universidad Politécnica Salesiana
Guayaquil, Ecuador
jlatag@est.ups.edu.ec

Abstract— El análisis y comparación de la irradiación solar de diferentes bases meteorológicas, con fines de generación de electricidad es un tema relevante y pertinente para contribuir con el desarrollo de proyectos energéticos sostenibles y la disminución de los efectos por el cambio climático. La irradiación solar constituye la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre proveniente del sol, y su nivel de intensidad depende de factores como la latitud, la altitud, las condiciones atmosféricas, el tipo de superficie y la estación del año en el Ecuador. Se identificó que existen diferentes métodos para medir y estimar la irradiación solar, tanto desde el espacio como desde el suelo: el sistema meteorológico proporciona información del clima y temporalidad que permiten obtener mapas de irradiación global o regional; las bases meteorológicas terrestres ofrecen datos más precisos y confiables, sobre la radiación solar directa e indirecta, pero también requieren una instalación costosa y un mantenimiento periódico.

Palabras Clave— Meteorología, irradiación, energía renovable, comparación de bases.

INTRODUCCIÓN

Según lo señalado por Gattinoni et al., la información meteorológica resulta de gran utilidad en diversas disciplinas, siendo aplicable en algunas de ellas como en la hidrología y la agronomía. Dentro de estaciones meteorológicas convencionales y mediante la asistencia de un observador capacitado generalmente se ha llevado a cabo la observación tanto de las variables como de los fenómenos meteorológicos [1].

Sin embargo, en los últimos años, se ha evidenciado un importante incremento de la utilización de estaciones meteorológicas de carácter automático durante los últimos años, gracias al desarrollo tecnológico y la conectividad; según la Organización Mundial Meteorológica en estas estaciones las observaciones se realizan y se transmiten de manera automática, lo que en teoría permite corregir problemas frecuentes, principalmente asociados con la percepción subjetiva del observador y las fallas comunes al momento de registrar los datos [2].

Partiendo de estas premisas, el objetivo de este estudio fue realizar una comparación entre los datos que provienen de dos estaciones a partir de diferentes parámetros estadísticos; en cuyo caso, el análisis comprendió los datos de radiación solar proporcionados por dos estaciones meteorológicas. En este tipo de estudios, según lo señalado por Gattinoni et al., intervienen diversos factores que deben ser analizados y además resulta importante tomar en cuenta el intervalo de medición usado en cada estación y considerar el entorno en el que estas se encuentran. [1]. Mientras que, para autores como Alonso, et al., a partir de un análisis preliminar, es recomendable extender el periodo de análisis

para evaluar la generalidad y la significancia de los resultados encontrados [3].

Dada la importancia de llevar a cabo este tipo de análisis para la obtención de datos meteorológicos precisos con diversos campos de aplicación, en las últimas décadas se han desarrollado un sinnúmero de investigaciones similares, entre las cuales se encuentra la de Brizuela et al., quien delimitó su estudio geográficamente en la provincia de Entre Ríos, ubicada en Argentina, sus resultados reflejaron un alto impacto de la precipitación a nivel socioeconómico en diversos sectores como el sector agropecuario. Además, se concluyó que la precipitación muestra una variabilidad alta y se presenta incertidumbre en los valores de los productos de satélite, dado esto se muestra la necesidad de examinar las estimaciones provenientes de satélite, con las mediciones realizadas de pluviómetros en tierra con el fin de valorar el comportamiento tanto a escala local como regional. En esta investigación se analizaron la información de los años 2010 y 2011 correspondiente a los datos obtenidos de precipitación que fueron estimados por satélite de la misión *Tropical Rainfall Measuring Mission* con dichas mediciones fueron llevadas a cabo en seis estaciones meteorológicas. Se efectuó un análisis de correlación tomando en consideración datos por día de precipitaciones acumuladas durante ocho días y los registros mensuales para cada estación meteorológica. En cuanto a los hallazgos finales, se expone un 95% de constancia, de modo que los autores concluyeron que no se revela diferencias representativas de varianzas para las cinco estaciones meteorológicas, técnicamente no existen divergencias de medias en dichas estaciones. A su vez, evidenciaron valores de datos diarios de correlaciones (r) entre 0.10 y 0.7, datos acumulados durante 8 días de entre 0.65 y 0.82 y precipitaciones mensuales entre 0.58 y 0.82, considerando un 95% de confianza en todos los coeficientes [4].

En el estudio de Picone y Campo que se desarrolló en la ciudad de Tandil, se ejecutó con el propósito de conocer el comportamiento y las características del clima urbano de dicho sector; se analizaron aspectos relevantes relacionados con este tipo de sistemas. Su principal objetivo radica en efectuar una comparación rural y urbana considerando ocho parámetros en sistemas meteorológicos, entre los años y meses de julio de 2010 y junio de 2011 respectivamente. Para este propósito fue necesario la utilización de información obtenida de dos estaciones, la primera es la estación meteorológica de la ciudad en estudio liderado por el Servicio Meteorológico Nacional, y la segunda es la estación meteorológica automática perteneciente al CIG para la obtención de datos urbanos. Posterior a la comparación realizada, se presenció en los parámetros analizados durante

un año una significativa influencia urbana por el efecto Niña [5].

En la investigación realizada por Bustos et al., se destacó que es importante la adquisición de los modelos numéricos para la obtención de datos climatológicos, considerando que en Argentina uno de los principales problemas corresponde a que la distribución espacial que se les atribuye a las estaciones meteorológicas es desigual considerando registros de los 50 años, lo que provoca el desarrollo de dificultades al momento de estudiar el clima. Siendo su objetivo establecer un modelo numérico que sea la mejor representación para las variables de: temperatura mínima, media y máxima del aire, humedad y precipitación que se registran en dicho país. Para esto se requirió el análisis de datos históricos de los años 1950-2010 encontrados en fuentes que pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional considerando los hallazgos a partir de los modelos NEW01, Reanálisis (NCEP/NCAR) y WorldClim. Se aplicaron las respectivas técnicas estadísticas (análisis de regresión, análisis de varianza, coeficientes de correlación, test de diferencia mínima significativa, determinación y concordancia) para llevar a cabo su comparación. Así mismo, para representar gráficamente los resultados se usaron métodos de interpolación por medio de un SIG. Dado esto, se puede decir que los modelos para caracterizar variables climáticas en sectores que no poseen registros fueron de gran utilidad. Por su parte, el NEW01 fue el más apropiado para efectuar la caracterización de las precipitaciones, en cambio El WorldClim se ajustó de mejor manera para los datos correspondientes a la temperatura media del aire [6].

Por otra parte, en el artículo de Vijayan y Sreekumar de la ciudad de Abu Dhabi, se analizaron las mediciones de radiación solar y su correlación con parámetros atmosféricos, los cuales están basados en nubes climatológicas de dos ubicaciones diferentes en los Emiratos Árabes Unidos: Madinat Zayed (latitud: 23.561 ° N y longitud: 53.709 ° E) y Sweihan (latitud: 24.530 ° N y longitud: 55.423 ° E). Las irradiaciones solares directas normales, globales y horizontales difusas se midieron, con una estación meteorológica de monitoreo solar de alta precisión. Los datos se analizaron durante un período de 2 años, desde enero de 2011 hasta diciembre de 2012, y se compararon con las mediciones de AOD (profundidad óptica de aerosol) y COD (profundidad óptica de nube) del satélite CALIPSO. Además, en este trabajo se logró establecer la relación entre la irradiación normal directa y las condiciones meteorológicas en los Emiratos Árabes Unidos. La investigación se desarrolló mediante el uso de herramientas de análisis de datos basadas en Matlab; el procesamiento estadístico de los datos les permitió concluir sobre la asociación lineal entre la irradiación normal y los parámetros atmosféricos y nubosidad [7].

Con base en estos antecedentes, se puede destacar que las investigaciones que se desarrollan sobre las predicciones de la radiación solar han acaparado un mayor interés en la actualidad, debido a los proyectos que se han desarrollado para impulsar el uso de energías renovables, como alternativa de solución para sobrellevar problemas ambientales que se relacionan con el uso de las energías no renovables. Por otra parte, la Inteligencia Artificial ha contribuido a introducir nuevas áreas de conocimiento, lo cual ha producido el logro de avances importantes en el marco de esta temática realizados durante la última década. Autores como Benavides

y Manso propusieron una alternativa de solución en base a clasificación supervisada, la cual esta combinada en un modelo que incluye una capa GRU (Gated Recurrent Units) y una capa convolucional. Aquí intervienen algunos factores, entre ellos: las clases, las cuales están definidas como intervalos de valores de radiación solar; los objetos, representados por valores correspondientes de temperatura ambiente; presión atmosférica; velocidad del viento y precipitación. Para esto, se cuenta con los datos de 112 estaciones meteorológicas, que contiene miles de registros correspondientes a dos años, estos fueron tomados de estaciones meteorológicas que se encontraban distribuidas en todo el territorio de Galicia. En este estudio fue necesario emplear la métrica Macro-F1 con el fin de evaluar la bondad de la clasificación dado que las clases se encuentran desbalanceadas [8].

En la investigación de Sayago et al., se señaló que el análisis de las estimaciones de radiación solar que impactan en la superficie terrestre es de suma relevancia, pues corresponde a una fuente de energía renovable primordial de la naturaleza, sin embargo, puntualizó que para obtener este tipo de datos se requieren de sistemas de medición que por lo general suelen ser complejos y costosos. Esto involucra el desarrollo de métodos para su estimación, tales como los numéricos de modelos matemáticos; entre los que se incluyen las redes neuronales, las cuales presentan la alternativa para la consideración de enfoques convencionales y tradicionales. Por lo tanto, estos autores llevaron a cabo su investigación con el objetivo de desarrollar redes neuronales que puedan estimar radiación solar horaria mediante el uso de variables meteorológicas que sean fáciles de adquirir. Los datos de entrada que se consideraron para la construcción de los seis modelos fueron: velocidad del viento, temperatura, lluvia y humedad relativa, estos se consiguieron de una estación meteorológica automática ubicada en la provincia de Córdoba. Finalmente, los resultados expusieron valores de RMSE% entre 25% y 48% y coeficientes de determinación entre 0,80 y 0,86 evidenciándose así un adecuado desempeño por parte de los modelos realizados para estimar la radiación solar horaria. Concluyendo que las redes neuronales pueden permitir la realización de estimaciones de la radiación solar de manera aceptable [9].

En el estudio de Alonso et al., se realizó la comparación de las estimaciones diarias de irradiación solar en el territorio uruguayo, mediante el análisis de los modelos del MSU (Mapa Solar del Uruguay) y SSE (Surface Solar Energy). En esta investigación se presentó evidencia de que en un modelo global como el SSE no se reflejan adecuadamente las peculiaridades del clima de la costa Atlántica. Por otra parte, se muestra una mejor y más óptima versión del modelo de Tarpley (BDJPT) mostrando una dependencia de los coeficientes en el brillo de la imagen de mapeo satelital, para esto realizan la evaluación de su desempeño sobre el territorio uruguayo mediante la comparación de estimativos de irradiación diaria aplicado a dos años de imágenes satelitales GOES-13, tomando en cuenta seis estaciones de la red de medidas de irradiación, que faciliten datos de superficie independientes y simultáneos. La información obtenida a partir de los datos de estas estaciones no se utiliza con el fin de ajustar los coeficientes del modelo. Además, se considera que el ajuste con respecto a medidas y estimativos es adecuado, con un RMS por día de 6.5% de la media de las medidas, finalmente, se puede decir que no se evidencian desvíos sistemáticos importantes ni por época del año ni por

región [3].

Otra de las investigaciones desarrolladas a nivel regional es la de Luna et al., quienes analizaron la irradiación solar en el territorio colombiano, considerando que de acuerdo con los registros nacionales se estima que un 50% de las zonas rurales no se encuentran conectadas a la red eléctrica, principalmente en departamento de Putumayo donde se registra un índice bajo de cobertura. Según los autores, las estimaciones sugieren que el potencial es alto en energía solar en Colombia, sin embargo, en la región seleccionada como área de estudio se desconoce su valor y esto es a causa de las diferencias geográficas que existen en sus subregiones. Por lo tanto, en este estudio se consideraron restricciones de carácter geográfico y técnico obtenido de la información a partir de diversas bases de datos con el fin de determinar el potencial efectivo para lograr generar electricidad solar en Putumayo. A raíz de este análisis, se demostró que el potencial efectivo solar más bajo se encuentra en la región Andina mientras que el más alto se presencia en la región Amazónica. Además, mediante la evaluación del consumo de energía eléctrica, se llega a la conclusión de que es posible satisfacer dicha necesidad por medio del uso de sistemas fotovoltaicos que produzcan energía eléctrica de autogeneración y generación descentralizada [10].

De acuerdo con Nollas et al., para el desarrollo de este tipo de proyectos, es importante considerar que las mediciones de radiación solar poseen una validez geográficamente localizada, es por esto por lo que se requieren cálculos con modelos de transferencia radiativa, métodos de interpolación, datos satelitales, entre otros, para conseguir ampliar el conocimiento del recurso solar a diversas regiones, para estos, son cruciales las mediciones localizadas en tierra a modo de validación. En Argentina, se han llevado a cabo diversas investigaciones en las que se han utilizado distintos parámetros para estimar la radiación solar; así como también existen registro de autores que desarrollaron mapas de radiación solar empleando usando información satelital como fuente de datos o por medio de modelos en base meteorológicas. Las bases de datos de reanálisis (BDR) planteadas por las agencias *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), se muestran como opciones de soluciones que sirvan para realizar la evaluación de los recursos de la energía solar en zonas que carezcan de este tipo de datos. Estas BDR presentan continuidad, son útiles a largo plazo, accesibles a todo público y poseen cobertura global, todo esto representa una ventaja ante las demás. Sin embargo, su resolución espacial es menor con respecto a información proveniente de datos de imágenes satelitales. Por lo tanto, los autores de este estudio de referencia buscaron ejecutar una comparación entre los datos de irradiación solar por día, la cual es integral de la irradiancia a plano horizontal en el transcurso de todas las horas de luz diurna de las bases de datos de reanálisis, ERA INTERIM, ERA5 y MERRA-2, con los resultados de las mediciones de las 9 estaciones meteorológicas de la red solarimétrica, la cual pertenece al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) situado en Argentina [11].

En el contexto del presente artículo, se buscó comparar los datos de irradiación solar proporcionados por los sistemas meteorológicos remotos *Ambient Weather* y *WU Weather Underground*, considerando que al igual que en otros países de la región, en el Ecuador existe una problemática

relacionada con los bajos índices de cobertura energética en las zonas rurales, como es el caso de la comuna Masa 2 del Golfo de Guayaquil. Además, se considera que por su ubicación en la zona ecuatorial es posible que existan condiciones meteorológicas que podrían favorecer al aprovechamiento de la irradiación solar para el desarrollo de propuestas que contribuyan a ampliar la cobertura y permitan diversificar las fuentes de energía que se utilizan actualmente, impulsando la sustitución paulatina de la energía no renovable hacia modelos sostenibles que ofrezcan una mayor eficiencia energética [12].

FUNDACIÓN MATEMÁTICA

En este artículo científico se realizó un análisis de subdivisión en la comuna Masa 2 del Golfo de Guayaquil localizada en la provincia del Guayas. Para la comparativa se obtuvieron, datos correspondientes a las horas diarias de iluminación solar (n) de la estación meteorológica, WS-2902D y de las bases de datos remotas *Ambient Weather* y *WU Weather Underground*, mediante el uso de estos datos, se realizó el cálculo de la irradiación solar mensual sobre la superficie horizontal, luego de esto se pudo obtener la irradiación sobre superficie inclinada y, posteriormente se consiguió la energía efectiva que es posible generar por medio de un sistema fotovoltaico.

Finalmente, a partir de la obtención de los valores correspondientes de energía renovable, que alcanza a generar y beneficiarse la comuna, se realizó una comparación de estos datos. Para este efecto, se tomó como base de referencia las ecuaciones utilizadas en el estudio de Luna et al., cuya pertinencia ha sido comprobada dada su frecuente aplicación en este tipo de estudios [10]. Por consiguiente, se procede a describir el procedimiento análisis para cada cálculo derivado de ecuaciones matemáticas. La ecuación de la irradiación solar mensual en la superficie horizontal $G_{dm}(0)$, el cálculo matemático de la irradiación solar se aplicó utilizando el método de Angstrom [13], y personalizado por Prescott et al., [14] mostrando según la ecuación:

$$\frac{G_{dm}(0)}{Bo_{dm}(0)} = a + b \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad (1)$$

En donde, $Bo_{dm}(0)$ representa el promedio diario mensual de la irradiación solar sobre la superficie horizontal, y se realiza el cálculo del promedio de cada mes de irradiación diaria $Bo_d(0)$:

$$Bo_{dm}(0) = \frac{24}{\pi} B_0 \varepsilon_0 (\omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s) \quad (2)$$

Donde, B_0 es una constante solar igual a 1367 W/m^2 , φ es la latitud de la ubicación del lugar y ε_0 es la constante del factor de la correlación de la órbita de la tierra.

Ecuación de la órbita de la tierra:

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (3)$$

El componente ω_s es el ángulo de la salida del sol, se representa en la siguiente ecuación $\omega_s = (-\tan \varphi \tan \delta)$, en la que δ corresponde al ángulo de la declinación según lo establecido por Spencer [15]. Ahora se utiliza un método de cálculo matemático, para poder calcular los factores (a) y (b) en la ecuación de Angstrom, por ende, se usará las dos ecuaciones comprobadas por Gopinathan, se muestran las siguientes ecuaciones:

$$a = -0.309 + 0.539 \cos \varphi - 0.0693h + 0.290 \left(\frac{n}{N}\right) \quad (4)$$

$$b = 1.527 + 1.027 \cos \varphi - 0.0926h + 0.359 \left(\frac{n}{N}\right) \quad (5)$$

Con la constante (h) se representa la altitud de la ubicación que se pretende analizar; la variable (N) es la máxima probabilidad de brillo de irradiación del sol, es equivalente a $2\omega_s/15$, en la que ω_s se explica en grados.

Por lo tanto, la investigación se basó en un análisis estadístico para representar las comparaciones, para este estudio se aplicó el método de Angstrom-Prescott, con la recopilación de los datos provenientes de sistemas meteorológicos remotos *Ambient Weather* y *WU Weather Underground*, luego se realizó la evaluación de los parámetros estadísticos correspondientes a: 1. el error de sesgo medio (ESM) equivalente al error sistemático, considerando que los valores positivos reflejan una sobrestimación, mientras que los negativos una subestimación; 2. el error porcentual medio (EPM) que corresponde a una medida global de la precisión de la estimación, en el cual se aceptan desviaciones menores al 0.9%; 3. la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM), la cual es positiva siempre y refleja las variabilidades de las estimaciones con respecto a los datos registrados. Cabe señalar que es aceptable que los resultados obtenidos de estos parámetros estén aproximados a cero. El cálculo de los datos estadísticos mencionados para las comparaciones se realiza según lo indicado en las siguientes ecuaciones.

$$ESM = \frac{\sum_1^{n_o} RGe - RGe}{n_o} \quad (6)$$

$$EPM = \frac{\sum_1^{n_o} \frac{RGe - RGe}{RGM} \cdot 100}{n_o} \quad (7)$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_1^{n_o} (RGe - RGM)^2}{n_o}} \quad (8)$$

Donde RGM es la variable de la radiación medida a calcular los datos provenientes de las estaciones, RGe es la variable de radiación estimada, y donde n_o es la variable del número de observaciones. Habiendo evaluado la irradiación $G_{dm}(0)$ se aplica con el propósito de evaluar la irradiación en la superficie inclinada $G_a(\alpha, \beta)$, correspondientemente α es la variable del ángulo de las orientaciones y β es la variable de inclinación. A continuación, se descompone la variable de irradiación global $G_{dm}(0)$ como es la suma correspondiente de la irradiación difusa diaria mensual $D_{dm}(0)$ y directa diaria mensual $D_{dm}(0)$, aplicando el método de Liu & Jordán, el cual la condición entre el índice de claridad $G_{dm}(0)/B_{o_{dm}}(0)$, y la fracción difusa $D_{dm}(0)/G_{dm}(0)$, esta variante se encuentra independiente de la latitud.

La irradiación anual en la superficie inclinada $G_a(\alpha, \beta)$, una de estas variables se da por la ecuación formulada por Page [16] que se muestra a continuación:

$$\frac{D_{dm}(0)}{G_{dm}(0)} = 1 - 1.13 \frac{G_{dm}(0)}{B_{o_{dm}}(0)} \quad (9)$$

Luego se calcula la irradiación horaria en la superficie inclinada $G_h(\alpha, \beta)$, para esto se consideró tomar el modelo de tres variables, que establece con exactitud la irradiación incidente la cual es formulada por la irradiación directa $B_h(\alpha, \beta)$, difusa $D_h(\alpha, \beta)$, y se expresa $R_h(\alpha, \beta)$, la

ecuación se representa en la siguiente forma:

$$G_h(\alpha, \beta) = B_h(\alpha, \beta) + D_h(\alpha, \beta) + R_h(\alpha, \beta) \quad (10)$$

En donde

$$B_h(\alpha, \beta) = \frac{B_h(0)}{\cos \theta_{zs}} \cdot \max(0, \theta_s) \quad (11)$$

La variable θ_s es el ángulo de incidencia en los rayos solares y la variable normal en el plano considerado, y θ_{sz} este es el ángulo cenital solar, obtenidos respectivamente en funciones senoidales. Mediante esto ya es posible realizar el cálculo de la irradiación directa horaria $B_h(0)$ y difusa horaria $D_h(0)$ por ende se usará la aplicación de estas ecuaciones [10]:

$$D_h(0) = r_d D_{dm}(0) \quad (12)$$

$$G_h(0) = r_g G_{dm}(0) \quad (13)$$

$$B_h(0) = G_h(0) D_h(0) \quad (14)$$

Siguientes ecuaciones

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \right) \quad (15)$$

$$r_g = r_d (a_g + b_g \cos \omega) \quad (16)$$

$$a_g = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047) \quad (17)$$

Correlación

$$b_g = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047) \quad (18)$$

La variable de la ecuación, (ω) corresponde al ángulo horario que equivale a $(12 - t_n) \pi/12$, con t_n con relación al tiempo transcurrido en horas. Por su parte, para la componente de irradiación difusa sobre la superficie inclinada $D_h(\alpha, \beta)$, se aplica el correspondiente método de cálculo por el modelo isotrópico, de Hay-Davies [17], presentado en esta ecuación:

$$D_n(\alpha, \beta) = D^c(\alpha, \beta) + D^l(\alpha, \beta) \quad (19)$$

En la que $D^c(\alpha, \beta)$ se define como el componente circunsolar que se obtiene de manera directa por el sol, y $D^l(\alpha, \beta)$ es la componente isotrópica obtenido de la semiesfera celeste, para lo cual se aplica el cálculo correspondiente a la siguiente ecuación:

$$D^c(\alpha, \beta) = \frac{D_h(0) k_l}{\cos \theta_{zs}} \cdot \max(0, \cos \theta_s) \quad (20)$$

$$D^l(\alpha, \beta) = D_h(0) (1 - k_l) \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (21)$$

Con la precisión del índice k_l de la anisotropía dada por la correlación $B_h(0)/B_0 \varepsilon_0 \cos \theta_{zs}$, por lo tanto, se representa el componente reflejado $R_h(\alpha, \beta)$, se calculará el componente $R_h(\alpha, \beta) = \rho_r G_h(0) (1 - \cos \alpha/2)$, con ρ_r

reflectividad del obtenida generalmente del suelo como interés (0.2). Considerando que el suelo es proporcionalmente horizontal debido a la infinita extensión a que se refleja la luz de forma isotrópica por el uso de las energías renovables, como alternativa. Para la obtención de la irradiación diaria de media mensual en la superficie inclinada $G_{dm}(\alpha, \beta)$ se aplicará la suma de las componentes $G_h(\alpha, \beta)$, en la siguiente ecuación:

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = \sum_{h=1}^{24} G_h(\alpha, \beta) \quad (22)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

La elección de la zona de investigación, la disponibilidad de fuentes para obtener energía renovable y la evaluación de las demandas de energía que cumplen con la carga mínima deseada en la zona de estudio, se abordan en el presente apartado. La determinación del tamaño del sistema se alcanzó tras realizar numerosas simulaciones de sistemas híbridos, explorando todas las combinaciones posibles.

Se seleccionaron los elementos a utilizar en función de la fuente; como objetivo general se analizó la irradiación solar de diferentes bases meteorológicas correspondientes a la comuna Masa 2 Golfo de Guayaquil, con la finalidad de conocer el potencial de generación de electricidad de energía. En primer lugar, fue importante determinar la ubicación de la implementación de un sistema meteorológico, para lograr una efectiva lectura de datos específicos relacionados son la irradiación solar, según se muestra en la figura 1:



Fig. 1. Ubicación Geografía del sistema meteorología en la Masa 2

Para presentar los datos y comparar estos resultados se utilizaron tablas y figuras de acuerdo con la información que se muestra en la pantalla del sistema meteorológica. Conforme a lo mencionado, este artículo científico muestra la necesidad de ayuda comunitaria enfocada en la labor social, partiendo del análisis de estudios comparativos de irradiación solar de dos bases meteorológicas, los resultados de análisis de estudios reflejaron los niveles de radiación solar que impactan en la comuna seleccionada.

En este caso, se utilizaron las bases meteorológicas, con sus propias plataformas digitales: *Ambient Weather* y *WU Weather Underground*, correspondientemente se aplicó la implementación del sistema meteorológico en la ubicación la comuna Masa 2, en la parte superior de la Escuela de Educación Básica Simón Bolívar Isla del Golfo. En la tabla 1, se detalla los datos de análisis de estudio meteorológicos de la base *Ambient Weather*:

LECTURA DETALLA DE LA BASE METEOROLÓGICA AMBIENT WEATHER

Solar	
UV Index	1

Solar Radiation	135.7W/m ²
-----------------	-----------------------

Fuente: WS-2902D [18]

Los datos de la medición obtenida de la base meteorológica *Ambient Weather* reflejaron que en la zona de estudio se registra niveles de irradiación solar se encuentra en un rango de 135.7 W/m² y puede alcanzar niveles más altos dependiendo del día y de otros factores intervinientes, como por ejemplo la nubosidad que se registre en la zona; así mismo se identificó un nivel de riesgo 1 que de acuerdo con la escala se categoriza como un riesgo bajo (0 a 2). En este caso, tomando como referencia las recomendaciones de Alonso, et al., [3] se tomaron datos complementarios durante los días 7 al 9 de febrero del 2024, de lo cual se obtuvieron los registros que se muestran en las figuras 2 y 3:



Fig. 2. Representación de la radiación solar en la Masa 2 datos de *Ambient Weather*.



Fig. 3. Radiación solar en la Masa 2 datos de *Ambient Weather*

De acuerdo con las mediciones realizadas, los niveles de radiación se incrementaron a 194.8 W/m² registrando su pico más alto de 368.2 W/m². Además, durante el periodo analizado se evidenció un mayor índice de irradiación el día 8 de febrero, en el que el pico más alto llegó a 226.1 W/m² registrado en el horario matutino de las 9:30 am. Por otra parte, de las lecturas realizadas por la base meteorológica *WU Weather Underground*, se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 2:

LECTURA DETALLA DE LA BASE METEOROLÓGICA WU WEATHER UNDERGROUND

Solar	
UV Index	4 UV Risk
Solar Radiation	456.60 watts/m ²

^b. Fuente: Weather Underground [19]

Según los datos recabados de la base meteorológica *WU Weather Underground*, en la comuna Masa 2 se registró un rango de irradiación solar de 456.60 W/m² estos datos triplican los registros proporcionados por la base *Ambient Weather*. Al mismo tiempo se evidencia un incremento de riesgo de exposición a radiación UV de nivel 4, pasando de

riesgo bajo a un riesgo moderado (3 a 5). En este caso, se realizaron mediciones en el día 9 de febrero del 2024, cuyos resultados se muestran en las figuras 4 y 5:

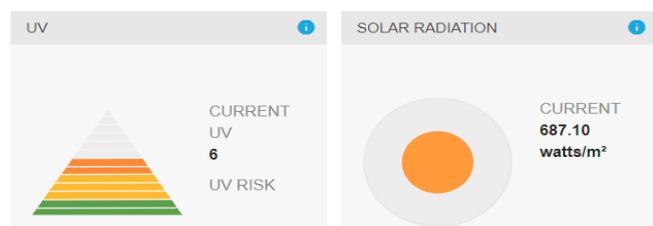


Fig. 4. Radiación solar/UV en la Masa 2 datos de WU Weather Underground

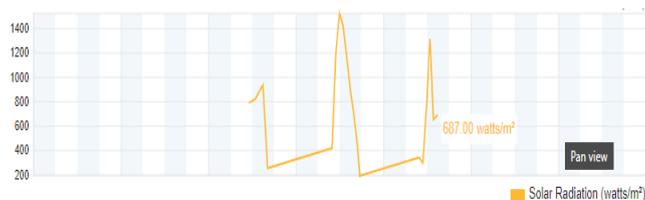


Fig. 5. Radiación solar en la Masa 2 datos de WU Weather Underground

Los resultados evidenciaron un incremento de los niveles de riesgo UV (6) alcanzando un nivel alto, así como también se registró un aumento en el rango de irradiación solar que alcanzó 687.10 W/m². Por lo tanto, todos los registros WU Weather Underground fueron superiores a los datos proporcionados por la plataforma Ambient Weather. A pesar de que ambas son herramientas completas que poseen una interfaz intuitiva con la cual es posible realizar el seguimiento de distintos parámetros meteorológicos, existen divergencias significativas entre los datos que ofrecen.

CONCLUSIONES

Se concluye que la base meteorológica Weather Underground es una herramienta completa para llevar a cabo el seguimiento de las variaciones en los parámetros meteorológicos, así como también para la recopilación de datos esenciales en el desarrollo de proyectos de energía sostenible. Este sistema proporciona datos precisos, alertas oportunas y una interfaz intuitiva para mantener a los usuarios informados sobre las condiciones climáticas locales y globales. Por lo tanto, es recomendable que se lleven a cabo estudios complementarios, a partir de algo más que de los datos registrados, que permitan ampliar el periodo de análisis y profundizar en los factores que inciden sobre las divergencias en los registros.

La base meteorológica Ambient Weather Network ofrece acceso a datos precisos y actualizados, lo que le permite al usuario informarse acerca de las condiciones meteorológicas en el área de intervención. En este caso en particular, se detectaron variaciones significativas entre los registros dados por ambas plataformas, sin embargo, se determinó que al obtenerse valores de irradiación solar altos en la comuna Masa 2 del Golfo de Guayaquil, puede resultar viable diseñar proyectos energéticos con los que se logre aprovechar este recurso para incrementar la cobertura de la red eléctrica en comunidades que actualmente carecen de este servicio básico, lo cual se lograría mediante el uso de sistemas fotovoltaicos que permiten aprovechar la radiación

solar que impacta en la zona para generar electricidad renovable.

REFERENCIAS

- [1] N. Gattinoni, T. Boca, C. Di Bella y C. Rebella, «Comparación entre observaciones meteorológicas obtenidas de estaciones automáticas convencionales a partir de la estimación de parámetros estadísticos», *RIA*, vol. vol. 37, n° no. 1, pp. pp. 75-85, marzo 2011.
- [2] R. Arteaga, R. Cervantes, M. Vázquez y W. Ojeda, «Estación meteorológica convencional versus automática sus diferencias evaluadas con índices estadísticos Chapingo, México», *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. vol. 8, n° n° 6, pp. pp. 1301-1314, junio 2017.
- [3] R. Alonso, M. D'Angelo y G. Abal, «Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en el Uruguay», *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. vol. 4, n° n° 2, pp. pp. 1-8, diciembre 2013.
- [4] A. Brizuela, M. D.Nosetto y C. Aguirre, «Comparación de datos de precipitación estimada por Trmm con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina», *UD y la Geomática*, n° n° 10, pp. pp. 18-26, octubre 2015.
- [5] N. Picone y A. Campo, «Análisis del confort climático en la ciudad de Tandil, Argentina», *Revista Geográfica Venezolana*, vol. vol. 1, n° n° 1, pp. pp. 114-127, 2016.
- [6] M. Bustos, F. Ferrelli y C. Piccolo, «Estudio comparativo de tres modelos climáticos en Argentina», *Anuario do Instituto de Geociências - UFRJ*, vol. vol. 40, n° n° 1, pp. pp. 34-43, enero 2017.
- [7] P. Vijayan y P. Sreekumar, «Analysis and Comparison of Solar Irradiance at Different Locations in Abu Dhabi», *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. pp. 1-6, febrero 2020.
- [8] L. Benavides y M. Manso, «Arquitectura neuronal para predicción de radiación solar en base a variables meteorológicas», *Congress in Geomatics Engineering*, pp. pp. 97-101, julio 2021.
- [9] S. Sayago, G. Ovando y M. Bocco, «Estimación de radiación solar diaria a partir de imágenes NASA-POWER con distintos índices de claridad», *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. vol. 21, n° n° 8, pp. pp. 08.49-08.58, septiembre 2017.
- [10] C. Luna, F. Jiménez, R. Moreno y L. Mulcué, «Potencial de irradiación solar para generar electricidad en el departamento del Putumayo de Colombia», *Revista UIS Ingenierías*, vol. vol. 19, n° n° 3, pp. pp. 153-162, 2020.
- [11] F. Nollas, E. Luccini, P. Orte, M. Skansi, G. Carbajal, E. Wolfram, M. Poggi y J. Lell, «Comparación entre datos de radiación solar de tres bases de datos de reanálisis y mediciones en superficie en Argentina», *Servicio Meteorológico Nacional Argentina*, pp. pp. 1-3, noviembre 2022.
- [12] A. Olarte, «La eficiencia energética, Desafíos y oportunidades en Ecuador», *Ciencias Técnicas y Aplicadas*, vol. vol. 8, n° n° 2, pp. pp. 1434-1441, 2022.
- [13] A. Angstrom, «Solar and terrestrial radiation», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. vol. 50, n° n° 210, pp. pp. 121-126, abril 1923.
- [14] J. Prescott, C. Bonython y J. Black, «Solar radiation and the duration of sunshine», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. vol. 80, n° n° 344, p. pp. 231-235, abril 1954.
- [15] J. Spencer, «Fourier Series Representation of the Position of the Sun», *Search*, vol. vol. 2, n° n° 5, p. p. 172, 1971.
- [16] J. Page, «Methods for the estimation of solar energy on vertical and inclined surfaces», *Solar Energy Conversion*, p. pp. 37-99, noviembre 1979.
- [17] J. Hay, «A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short - wave radiation», *Atmosphere*, vol. vol. 14, n° n° 4, p. pp. 278-287, noviembre 1976.
- [18] Ambient Weather, 2024. [En línea]. Available: <https://ambientweather.net/>. [Último acceso: 7 febrero 2024].
- [19] Weather Underground, 2024. [En línea]. Available: <https://www.wunderground.com/>.