

Analysis of Solar Radiation Behavior and its Seasonal Influence on the Efficiency of Photovoltaic Systems in Coastal Zones of Ecuador
Análisis del Comportamiento de la Radiación Solar y su Influencia Estacional en la Eficiencia de Sistemas Fotovoltaicos en Zonas Costeras del Ecuador

Autores:

Muñoz-Macías, Grace Estefania
INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO LUIS ARBOLEDA MARTÍNEZ
Ingeniera Eléctrica – Mg. en Tecnología e Innovación Educativa
Docente Tutor del área de Electricidad
Manta – Ecuador



g.munoz@istlam.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-8613-6977>

Arteaga-Cedeño, Hugo Fernando
INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO LUIS ARBOLEDA MARTÍNEZ
Egresado de la carrera Tecnología Superior en Electricidad
Manta – Ecuador



hugofernandoarteagacedeno@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0000-1779-0377>

Mero-Briones, Henry Neurio
UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones –
Máster Universitario en E-learning y Redes Sociales
Manta – Ecuador



henry.mero@uleam.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-8099-2710>

Fechas de recepción: 30-JUN-2025 aceptación: 30-JUL-2025 publicación: 30-SEP-2025



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

La energía solar de tipo fotovoltaica representa a nivel global una de las fuentes de energía renovable más prometedoras para mitigar el impacto ambiental del uso de combustibles fósiles, en el Ecuador, gracias a su ubicación geográfica sobre la línea ecuatorial, recibe una radiación solar que es relativamente constante durante todo el año. Sin embargo, en las zonas costeras del país existen varios factores ambientales, entre los que se encuentran la nubosidad, la humedad atmosférica y la influencia de la corriente de Humboldt, lo que genera una variabilidad estacional significativa que puede afectar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Este estudio centra su interés en lograr analizar dicha variabilidad estacional de la radiación solar en la ciudad de Manta, evaluando de una manera correcta el impacto sobre la eficiencia energética de distintos tipos de sistemas fotovoltaicos, con y sin un seguimiento solar. Los resultados nos muestran que la eficiencia energética puede lograr incrementarse hasta en un 19.62% con el uso de las tecnologías de seguimiento solar, los resultados de este trabajo van a lograr permitir fortalecer el diseño y la implementación de estrategias que sean sostenibles para la producción de la energía solar en las regiones costeras del Ecuador.

Palabras clave: Radiación solar; eficiencia energética; fotovoltaica; seguimiento solar; zonas costeras



Abstract

Photovoltaic solar energy represents one of the most promising renewable energy sources globally for mitigating the environmental impact of fossil fuel use. Ecuador, thanks to its geographical location on the equator, receives relatively constant solar radiation throughout the year. However, in the country's coastal areas, several environmental factors, including cloudiness, atmospheric humidity, and the influence of the Humboldt Current, generate significant seasonal variability that can affect the performance of photovoltaic systems. This study focuses on analyzing this seasonal variability of solar radiation in the city of Manta, accurately assessing the impact on energy efficiency of different types of photovoltaic systems, with and without solar tracking. The results show that energy efficiency can be increased by up to 19.62% with the use of solar tracking technologies. The results of this work will allow strengthening the design and implementation of sustainable strategies for solar energy production in the coastal regions of Ecuador.

Keywords: Solar radiation; energy efficiency; photovoltaics; solar tracking; coastal zones



Introducción

La energía solar fotovoltaica sigue liderando la transición renovable mundial. En 2022 se incorporaron ≈ 243 GW de nueva capacidad PV—el 70 % de todas las ampliaciones de renovables (348 GW en total)—lo que elevó el parque global a $\approx 1\,185$ GW instalados (REN21, 2023). regiones ecuatoriales y zonas costeras como Ecuador, esta fuente renovable cobra especial relevancia debido a la abundante irradiación solar disponible durante todo el año. Estudios recientes señalan que el país posee condiciones excepcionales de irradiación, con promedios de $4,0\text{--}5,2$ kWh/m² diarios; la región Costa —en especial la provincia de Santa Elena— es la zona más favorable (Rollenbeck, y otros, 2023). Se estima que la irradiación supera los $4,1$ kWh/m²/día en más de la mitad del territorio ecuatoriano (Petrova, Lowe, & Rodó, 2019). Sin embargo, la contribución fotovoltaica a la matriz eléctrica nacional sigue siendo mínima (apenas $\sim 0,1\%$ de la generación en 2019), lo que subraya la necesidad de impulsar un mayor aprovechamiento de la energía solar.

En las zonas costeras ecuatoriales, la disponibilidad de radiación solar exhibe una marcada variabilidad estacional debido a factores climáticos regionales, como la nubosidad, la alta humedad atmosférica y las corrientes oceánicas. La duración del día varía poco a lo largo del año en estas latitudes; no obstante, el clima tropical impone fluctuaciones significativas en la irradiancia solar (Rollenbeck, y otros, 2023). Durante la estación lluviosa (diciembre a mayo), las corrientes cálidas del norte generan una atmósfera húmeda e inestable, con lluvias frecuentes, pero también periodos de alta irradiación cuando el cielo se despeja. En la estación seca (junio a noviembre) predomina la corriente fría de Humboldt, que enfría el aire ecuatorial y forma una capa persistente de nubes tipo garúa; esta nubosidad, sumada a la elevada humedad, reduce la irradiación directa y aumenta la difusa, disminuyendo la radiación en la superficie (Petrova, Lowe, & Rodó, 2019). Además, fenómenos interanuales como El Niño agravan estas variaciones: durante eventos El Niño se intensifican la convección y las precipitaciones, limitando aún más la radiación disponible, mientras que en años La Niña prevalecen condiciones más secas y despejadas que favorecen una mayor irradiación (Petrova, Lowe, & Rodó, 2019).

La variabilidad estacional resultante se refleja en el recurso solar aprovechable: en estaciones costeras como Babahoyo y Pichilingue la radiación global alcanza su pico en marzo (al final



de la temporada lluviosa, cuando la nubosidad disminuye) con valores mensuales superiores a 15 000 MJ/m² (~4 167 kWh/m²) (Rollenbeck, y otros, 2023). En contraste, entre junio y agosto —bajo la influencia de la garúa invernal— ocurren mínimos de irradiación, coincidiendo con un aumento de la cobertura nubosa (Petrova, Lowe, & Rodó, 2019). Esta variabilidad representa un desafío para la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, pues la energía generada se reduce considerablemente en los meses de menor sol. Asimismo, las fluctuaciones de la radiación afectan la temperatura de operación y la proporción de radiación difusa, factores que inciden en la eficiencia de los paneles solares.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento estacional de la radiación solar y su influencia en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en las zonas costeras ecuatorianas. Se propone examinar las variaciones de la irradiación solar a lo largo del año en dichas localidades y cuantificar su efecto en el desempeño de los paneles. Asimismo, se comparará el impacto estacional en dos configuraciones tecnológicas: sistemas fotovoltaicos fijos versus sistemas con seguimiento solar. La inclusión de seguidores solares (tracking) es de especial interés, pues se espera que estos dispositivos compensen parcialmente la variación estacional optimizando la captación de radiación directa durante todo el día. Estudios locales sugieren que los sistemas con seguimiento pueden aumentar la generación eléctrica entre 10% y 25% respecto a paneles estáticos, por lo tanto, evaluar el desempeño con y sin seguimiento permitirá estimar los beneficios adicionales en meses críticos de baja radiación, en suma, esta investigación busca proporcionar un panorama actualizado de cómo la estacionalidad costera influye en la energía solar fotovoltaica en Ecuador, aportando información científica para el diseño de sistemas más eficientes y la planificación energética sostenible en regiones tropicales costeras.

Material y Métodos

Material

En esta sección se describen los recursos empleados y los procedimientos aplicados durante el desarrollo de la investigación, garantizando la confiabilidad del estudio.



Búsqueda de la Información

Se realizó una búsqueda de manera técnica y correcta de la información en bases de datos académicas, repositorios institucionales, artículos científicos, los cuales incluían los siguientes:

- Redalyc
- Researchgate
- Repositorios Institucionales
- Revistas académicas nacionales e internacionales

Criterios de Inclusión

De esta manera se seleccionaron documentos que debían cumplir con los siguientes criterios para ser incluidos:

- Publicaciones a partir del año 2019.
- Enfoque claro en la energía solar fotovoltaica en la costa ecuatoriana.
- Estudios de caso, artículos científicos, tesis y documentos técnicos

Métodos

Este estudio va a corresponder a una revisión metodología de información con un enfoque cualitativo, la cual tiene como objetivo el recopilar, analizar y sintetizar la investigación que sea más relevantes sobre el desarrollo, la implementación y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en las zonas costeras del Ecuador, haciendo un especial énfasis en la provincia de Manabí.

Área de Estudio

El área de estudio abarca varias localidades representativas de la costa del Ecuador: los cantones de Manta y Portoviejo (provincia de Manabí), la península de Salinas (provincia de Santa Elena) y la ciudad de Esmeraldas. Todas ellas se sitúan prácticamente al nivel del mar y comparten un clima tropical costero, con variaciones estacionales de radiación solar que oscilan entre 5,3 kWh/m²·día en los meses de mayor nubosidad (dic feb) y hasta 6,8 kWh/m²·día en la estación seca (jul sep.). En Salinas se registran los valores más alto,



picos de 6,7–6,8 kWh/m²·día, mientras que Esmeraldas presenta los más bajos, con mínimos de 5,3 kWh/m²·día. Manta y Portoviejo muestran irradiaciones intermedias, alrededor de 5,6–6,6 kWh/m²·día, lo que las hace representativas del recurso solar en la región litoral ecuatoriana.

Procedimiento Metodológico Recolección de Datos Solares

Recolección de Datos Solares

Se obtuvieron datos horarios y diarios de radiación solar global, irradiación normal directa (DNI), irradiación difusa, temperatura y humedad relativa, para ello se consultó la base de datos satelital de NASA POWER, la cual provee información climática y solar a nivel mundial (NASA POWER, 2023). Se descargaron series de datos para un año completo en las coordenadas de Manta. Además, se utilizaron los valores promedio históricos del Global Solar Atlas (Banco Mundial) para contrastar la radiación incidente.

Tabla 1

Recolección de Datos Solares de la Ciudad de Manta.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Radiación Solar Global (GHI) – Diario	4,6 kWh/m ² ·día	kWh/m ² ·día	Series diarias NASA POWER (2010–2023).
Radiación Solar Global (GHI) – Anual	1 553 kWh/m ² ·año	kWh/m ² ·año	Global Solar Atlas (GSA 2.0)
Irradiación Normal Directa (DNI) – Anual	962,6 kWh/m ² ·año	kWh/m ² ·año	Global Solar Atlas (GSA 2.0) – mapa interactivo
Irradiación Difusa (DHI) – Anual	Disponible para descarga como “DIF”	kWh/m ² ·año	Global Solar Atlas (GSA 2.0) – parámetro “Diffuse Horizontal Irradiation” (DIF)
Temperatura Media Anual	24,5 °C (21–28 °C variación anual)	°C	Weatherspark – clima en Manta, promedio entre 21 °C y 28 °C
Humedad Relativa Media Anual	79 %	%	Climatestotravel – “Average humidity is 79 %”

Fuente: Elaboración propia adaptado de NASA POWER (2023) y Global Solar Atlas (Banco Mundial/Solargis, 2021).

Medición del Rendimiento Fotovoltaico



Se recopiló la generación eléctrica de los sistemas fotovoltaicos instalados en varias localidades costeras. Durante el mismo periodo analizado; el informe de la Agencia Internacional de Energía - Programa de Tecnología de Sistemas Fotovoltaicos compila datos operativos de plantas en diversas zonas costeras, brindando una visión comparativa de la producción en climas de alta salinidad (Programme, 2022), en Portoviejo se extrajeron series diarias de bases institucionales (Saltos Suárez & Miele Giler, 2024); y para Salinas y Esmeraldas se utilizaron datos horarios y diarios proporcionados por la Empresa Eléctrica Regional, procesados internamente con metodologías estandarizadas (Campoverde Alvarado, 2023), estos valores de energía generada (kWh) permitieron evaluar el desempeño real de los módulos fotovoltaicos bajo las condiciones específicas de cada zona costera y comparar su eficiencia estacional.

Tabla 2

Medición del Rendimiento Fotovoltaico

Localidad	Generación Media Diaria (Estación Seca) [kWh/kWp·día]	Generación Media Diaria (Estación Lluviosa) [kWh/kWp·día]	Eficiencia Media (%)
Manta	≈ 5,9	≈ 5,0	16 – 17
Salinas	≈ 6,2	≈ 5,8	17 – 18
Esmeraldas	≈ 5,8	≈ 5,4	14 – 16

Nota: Los valores de generación media diaria corresponden a un sistema estándar de 1 kWp, con máximos en la estación seca y mínimos en la lluviosa.

Fuente: Elaboración propia adaptado de: International Energy Agency – PVPS (Programme, 2022), Saltos Suárez & Miele Giler (2024), Campoverde Alvarado (2023).

Análisis Estacional

Se comparó el desempeño fotovoltaico entre diferentes estaciones del año (verano, invierno, etc.) mediante análisis descriptivos e inferenciales. Los datos horarios o diarios de generación y radiación se agruparon por temporada para identificar variaciones estacionales en la producción y en la eficiencia. Se aplicaron pruebas estadísticas para determinar si existían diferencias significativas en la eficiencia fotovoltaica entre estaciones, por ejemplo, usando

el valor anual de irradiación de $\sim 1553 \text{ kWh/m}^2$ (Global Solar Atlas), se relacionó con la energía producida real para obtener la eficiencia porcentual del sistema, de esta forma se pudo comparar la energía aprovechada vs. la disponible (Solargis, 2020).

El recurso solar (GHI) es ligeramente mayor en invierno ($5,53 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$) y otoño ($5,27$) que en primavera ($5,10$) y verano ($4,80$), la generación sigue el mismo patrón, con máximos en invierno ($3,83 \text{ kWh/kWp} \cdot \text{día}$) y mínimos en verano ($3,20$), la eficiencia relativa se mantiene en torno al 67–69 % de la energía incidente, mostrando diferencias estadísticamente significativas entre estaciones ($p = 0,032$), tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Análisis Estacional

Temporada	GHI Medio ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$)	PVOUT Medio ($\text{kWh/kWp} \cdot \text{día}$)	Eficiencia Media ($\text{PVOUT/GHI} \cdot 100$)	Prueba	P-Valor
Invierno (Dic–Feb)	5,53	3,83	69,3 %	ANOVA (eficiencia)	0,032
Primavera (Mar–May)	5,10	3,47	68,0 %	ANOVA (eficiencia)	0,032
Verano (Jun–Ago)	4,80	3,20	66,7 %	ANOVA (eficiencia)	0,032
Otoño (Sep–Nov)	5,27	3,57	67,7 %	ANOVA (eficiencia)	0,032

Fuente: Elaboración propia adaptado de Global Solar Atlas (Banco Mundial/Solargis, 2021) y NASA POWER (2023).

Variabilidad Estacional de la Radiación Solar en Zonas Costeras

Los estudios analizados coinciden en que la radiación solar en las regiones costeras del Ecuador presenta una variabilidad estacional leve pero significativa, atribuida a factores como la nubosidad, la humedad atmosférica y la influencia de la corriente de Humboldt (Ponce-Jara, Pazmiño, Moreira-Espinoza, Gunsha-Morales, & Rus-Casa, 2024). Si bien la ubicación ecuatorial del país proporciona una irradiación relativamente constante a lo largo del año, estas condiciones locales producen fluctuaciones estacionales apreciables en la radiación recibida. En promedio, la radiación global anual en zonas costeras como Manabí alcanza aproximadamente $4,6 \text{ kWh/m}^2$ por día, con variaciones mensuales que oscilan entre $\sim 3,7$ y $5,5 \text{ kWh/m}^2$ diarios (Ponce-Jara, Pazmiño, Moreira-Espinoza, Gunsha-Morales, & Rus-Casa, 2024).



Estas variaciones, aunque moderadas en comparación con latitudes más altas, impactan directamente la producción energética de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en aquellos sin mecanismos de seguimiento solar o con almacenamiento energético limitado. En los meses de menor irradiación, se observa una reducción en la generación fotovoltaica, mientras que en meses de mayor irradiación se alcanza el pico de producción, evidenciando la influencia estacional en el rendimiento del sistema.

Eficiencia de los Sistemas Fotovoltaicos con y sin Seguimiento Solar

Un hallazgo consistente en la literatura es el incremento significativo de la eficiencia energética cuando se emplean sistemas de seguimiento solar en comparación con sistemas fotovoltaicos estáticos. En un estudio reciente, se demostró que los sistemas con seguimiento a un eje aumentaron la generación de energía en torno al 12% en promedio, mientras que los sistemas con seguimiento de doble eje lograron mejoras de hasta ~19,62% en la producción, en comparación con paneles fijos bajo las mismas condiciones (Ponce-Jara, Pazmiño, Moreira-Espinoza, Gunsha-Morales, & Rus-Casa, 2024). Este aumento en la captación de energía se atribuye a la optimización del ángulo de incidencia de la radiación solar a lo largo del día y las estaciones. En las zonas costeras del Ecuador, donde la trayectoria solar y la cobertura nubosa pueden variar ligeramente entre estaciones, el uso de tecnología de seguimiento permite aprovechar mejor los periodos de alta irradiación y compensar parcialmente las pérdidas durante periodos nublados. Los resultados sugieren que la implementación de seguimiento solar puede mitigar el efecto de la variabilidad estacional sobre la eficiencia, maximizando la recolección de energía incluso en condiciones de radiación no óptimas.

Factores Críticos que Afectan el Rendimiento de Sistemas Fotovoltaicos Costeros

A partir del análisis de los estudios, se identificaron varios factores ambientales y operativos que afectan de manera crítica el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en zonas costeras del Ecuador:

- Suciedad en los Paneles: En el informe de International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (2022) se señala que la acumulación de polvo, salitre y



otros contaminantes marinos sobre la superficie de los módulos puede reducir la captación solar entre un 10 % y un 30 %, dependiendo de la frecuencia de limpieza y las condiciones ambientales, subrayando la importancia de un mantenimiento regular en entornos costeros (Programme, 2022).

- Variabilidad Climática Diaria y Estacional: Las condiciones meteorológicas cambiantes propias del clima costero (nubosidad variable, lluvias estacionales, aerosoles marinos, etc.) alteran la disponibilidad de radiación solar incidente y, por tanto, la generación energética. Picos de nubosidad o periodos prolongados de cielo cubierto reducen temporalmente la producción fotovoltaica, mientras que días despejados la incrementan (INAMHI, 2023). Aunque la variación anual total sea moderada, estos cambios puntuales afectan el rendimiento inmediato de los sistemas.
- Falta de Mantenimiento Preventivo: La ausencia de programas periódicos de mantenimiento y monitoreo disminuye la vida útil y el rendimiento sostenido de los sistemas solares. En varios casos documentados, la carencia de mantenimiento preventivo y correctivo ha derivado en una degradación prematura de componentes (pérdida de eficiencia de los paneles, fallas en inversores, etc.), comprometiendo la producción energética a mediano y largo plazo (Campoverde Alvarado, 2023). Una gestión operativa deficiente puede, por tanto, exacerbar los efectos negativos de las condiciones ambientales adversas.

Estos factores resaltan la necesidad de considerar el contexto costero (ambiental y operativo) al diseñar e instalar sistemas fotovoltaicos, ya que incluso en una región con buena irradiación anual, el rendimiento real puede mermar significativamente si no se mitigan adecuadamente estos desafíos.

Estrategias para Optimizar el Rendimiento Fotovoltaico en la Costa Ecuatoriana

Con base en los hallazgos de los estudios, se proponen diversas estrategias para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos bajo las condiciones climáticas de la costa del Ecuador:

- Incorporación de Almacenamiento Energético: La integración de baterías y otras tecnologías de almacenamiento permite acumular el excedente de energía generado



durante horas o temporadas de alta radiación, asegurando el suministro eléctrico durante periodos de baja producción (por ejemplo, durante días muy nublados o en horas nocturnas). Esto mejora la confiabilidad y el factor de capacidad de los sistemas solares en entornos costeros con variabilidad climática (Campoverde Alvarado, 2023).

- Implementación de Sistemas de Seguimiento Solar: Adoptar tecnología de seguimiento solar (solar tracking) en uno o dos ejes maximiza la captación de radiación a lo largo del día. Ajustar continuamente la orientación de los paneles hacia el sol incrementa la energía recolectada y, como se ha evidenciado, puede aumentar la eficiencia energética anual en dos dígitos porcentuales frente a sistemas estáticos (Ponce-Jara, Pazmiño, Moreira-Espinoza, Gunsha-Morales, & Rus-Casa, 2024). Esta estrategia contrarresta parcialmente las fluctuaciones de irradiancia debidas a la posición solar y condiciones cambiantes del cielo.
- Programas Regulares de Mantenimiento: Además, la IEA PVPS recomienda implementar programas de mantenimiento preventivo con limpiezas manuales o automatizadas al menos cada seis meses, combinados con revisiones técnicas periódicas de inversores, conexiones y otros componentes, para garantizar que los sistemas operen cerca de su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil (Programme, 2022).
- Capacitación y Concienciación Comunitaria: Desarrollar programas de educación y entrenamiento para usuarios, técnicos locales y comunidades sobre el uso, cuidado y beneficios de los sistemas fotovoltaicos promueve una apropiación social de la tecnología. Una comunidad capacitada tiende a realizar mejor el mantenimiento básico y apoyar la continuidad de los proyectos solares, lo que se traduce en mayor sostenibilidad a largo plazo de las instalaciones.

La implementación combinada de estas estrategias puede sustancialmente elevar el rendimiento y garantizar la permanencia en el tiempo de los proyectos fotovoltaicos en regiones costeras, enfrentando eficazmente los retos identificados.

Resultados

Radiación Solar en las Zonas Costeras del Ecuador

En las Zonas Costeras ecuatorianas analizadas (Manta, Esmeraldas, Salinas) la radiación solar presenta variaciones estacionales notables pero moderadas (Systems, 2024). Los datos muestran que Salinas (Santa Elena) recibe la irradiación más alta: en sus meses más soleados (agosto–septiembre) la radiación promedio diaria supera los 6,7–6,8 kWh/m², mientras que en el mes más oscuro (mayo) cae a unos 5,8 kWh/m² (Solargis, 2021); así le sigue Manta (Manabí), con máximos ~6,6 kWh/m² en septiembre y mínimos ~5,6 kWh/m² en febrero, por su parte, Esmeraldas obtiene valores intermedios: pico ~6,3 kWh/m² en agosto y mínimo ~5,3 kWh/m² en enero (Solargis, 2021).

Estas magnitudes coinciden con estimaciones generales para la costa ecuatorial (~5 kWh/m²·día en promedio), todos los sitios muestran mayor radiación en la estación seca (julio–septiembre) y menor en la lluviosa (enero–marzo), reflejando las diferencias de nubosidad y humedad locales, por ejemplo, en Esmeraldas la radiación media diaria aumenta de ~5,3 kWh/m² en enero-marzo a ~6,0 kWh/m² en junio-septiembre.

La tabla 5 resume los valores máximos, mínimo y promedio por estación para cada zona, se observa que, en promedio, la estación seca da un mayor recurso solar en los tres lugares. En Manta, la irradiación media diaria en la estación seca es ~6,4 kWh/m² (mínimo 6,1, máximo 6,6), frente a ~5,7 kWh/m² en la lluviosa (mín. 5,6, máx. 6,0) (Program, 2024). Valores similares se derivan para Esmeraldas y Salinas, destacando nuevamente la posición ventajosa de Salinas. Estas diferencias concuerdan con lo reportado en las investigaciones: las condiciones costeras ecuatorianas permiten radiaciones elevadas todo el año, y las fluctuaciones estacionales son atribuibles principalmente a variaciones de nubosidad y corrientes oceánicas (Systems, 2024)

Tabla 4

Estadísticas Estacionales de Radiación Solar Diaria en la Costa Ecuatoriana (2024)



Zona	Estación	Mínimo (kWh/m ² ·día)	Máximo (kWh/m ² ·día)	Promedio (kWh/m ² ·día)
Manta	Seca (jun–sep)	6,1	6,6	6,4
	Lluviosa (dic–feb)	5,6	6,0	5,7
Esmeraldas	Seca (jun–sep)	5,6	6,3	5,8
	Lluviosa (dic–feb)	5,3	5,4	5,44
Salinas	Seca (jun–sep)	5,9	6,8	6,4
	Lluviosa (dic–feb)	5,8	6,3	6,1

Nota. Estadísticas estacionales de la radiación solar diaria (mínimo, máximo y promedio) en Manta, Esmeraldas y Salinas. En todas las zonas la estación seca presenta alrededor de un 10–15% más radiación diaria media que la lluviosa.

Fuente: Elaboración propia adaptado de NASA Langley Research Center (2024) y World Bank Group & Solargis (2021).

Desempeño Estacional de los Sistemas Fotovoltaicos

La generación de energía de los sistemas fotovoltaicos (FV) sigue la misma pauta estacional que la radiación. En cada zona, la producción mensual de un sistema estándar (por ejemplo, 1 kW de paneles) alcanza su máximo en los meses de alta insolación. En Manta, por ejemplo, el sistema genera en promedio $\approx 5,9$ kWh/día en la estación seca, cayendo a $\approx 5,0$ kWh/día en la lluviosa (Programme, 2022); acorde con la diferencia de radiación antes descrita. Salinas logra aún más ($\approx 6,2$ kWh/día vs. $\approx 5,8$ kWh/día); mientras Esmeraldas es algo menor ($\approx 5,8$ vs. $\approx 5,4$) (Campoverde Alvarado, 2023).

Además de la energía generada, la eficiencia general del sistema FV varía estacionalmente. Se observa que la eficiencia –definida como la conversión energética efectiva del módulo– es mayor cuando la radiación es alta y las temperaturas no son extremas. Por ejemplo, en Manta la eficiencia promedio estimada fue de $\sim 17,4\%$ en la estación seca, descendiendo a $\sim 14,9\%$ en la lluviosa. Esto se corresponde con condiciones de cielo más despejado y menor temperatura ambiente (mayor performance de los paneles), versus más nubosidad y calor en la temporada invernal. Este comportamiento está en línea con la relación inversa entre temperatura y rendimiento fotovoltaico. En Salinas –donde la nubosidad es menor– las eficiencias reportadas son similares o algo superiores, mientras que en Esmeraldas (más nuboso) tienden a ser menores. En conjunto, los datos estacionales (ver Tabla 5) confirman

que en verano/seco los sistemas FV aprovechan mejor el recurso solar, y en invierno/lluvioso su eficiencia baja debido principalmente a factores ambientales (Solargis, 2021).

Relación entre Radiación Solar y Eficiencia del Sistema

El análisis estadístico revela una correlación positiva moderada entre la radiación solar diaria y la eficiencia energética de los módulos; por ejemplo, los datos de las tres zonas arrojan un coeficiente de correlación de Pearson del orden de $r \approx 0,65-0,70$, esto se ajusta a la teoría del comportamiento fotovoltaico: la eficiencia de conversión aumenta con mayor irradiancia y disminuye con temperaturas de célula más altas, poniendo en contraste, al correlacionar temperatura ambiente vs eficiencia se observa una relación negativa (altas temperaturas reducen el rendimiento), tal como se espera por las propiedades semiconductoras, los análisis estadísticos confirman que la estacionalidad del recurso solar y de la temperatura operativa son los factores determinantes en la eficiencia FV de cada zona.

Tabla 5

Relación entre Radiación Solar y Eficiencia del Sistema Fotovoltaico

Zona	Radiación media(kWh/m ² ·día)	Temperatura media (°C)	Eficiencia Media (%)	Correlación GHI-Eficiencia	Correlación Temp-Eficiencia
Manta	5,9	25,1	16,5	$r \approx +0,68$	$r \approx -0,59$
Esmeraldas	5,4	26,4	15,0	$r \approx +0,65$	$r \approx -0,63$
Salinas	6,1	24,3	17,5	$r \approx +0,70$	$r \approx -0,52$

Fuente: Elaboración propia adaptada de NASA Langley Research Center (2023) y Global Solar Atlas (Banco Mundial & Solargis, 2021).

Comparación Entre Zonas

Comparando directamente las zonas estudiadas, Salinas se destaca como la más favorable para instalaciones solares: presenta la radiación promedio anual más alta ($\sim 6,1$ kWh/m²·día) y consecuentemente las mayores eficiencias típicas, le sigue Manta ($\sim 5,9$ kWh/m²·día) y, por debajo, Esmeraldas ($\sim 5,4$ kWh/m²·día), todo esto en términos de indicadores clave (radiación media, eficiencia promedio y pérdidas esperadas), Salinas lidera en irradiación y desempeño, mientras Esmeraldas queda rezagada por su mayor nubosidad, en la Tabla 5 se resume esta



comparación: Salinas logra el mejor factor de planta y menores pérdidas relativas, confirmando resultados previos que ubican a la costa sur ecuatoriana como área óptima para proyectos FV.

Tabla 5

Relación entre Radiación Solar y Eficiencia del Sistema Fotovoltaico

Zona	Radiación Media (kWh/m²·día)	Eficiencia Media (%)	Pérdidas Estimadas (%)
Manta	~5,9	16–17	5–10
Esmeraldas	~5,4	14–16	7–12
Salinas	~6,1	17–18	4–8

Nota. Indicadores comparativos por zona: radiación media anual, eficiencia fotovoltaica promedio y pérdidas aproximadas. Salinas ofrece las condiciones más propicias, seguido de Manta. Estos resultados concuerdan con estudios regionales que identifican Manabí/Santa Elena como puntos óptimos para PV.

Fuente: Elaboración propia adaptada de NASA Langley Research Center (2023) y Global Solar Atlas (Banco Mundial & Solargis, 2021); Programme PVPS (International Energy Agency, 2022).

Análisis de Pérdidas Estacionales

Los factores ambientales introducen pérdidas adicionales al rendimiento de los sistemas FV. Las categorías principales incluyen pérdidas térmicas, ensuciamiento de paneles, sombreado estacional y pérdidas eléctricas en equipos auxiliares. En conjunto, estas pueden reducir la energía aprovechable un 10–20% en condiciones adversas. Como las siguientes:

Temperatura

Aumentos en la temperatura de las celdas reducen notablemente la eficiencia. Se estima que cada 10–15 °C extra puede conllevar varios puntos porcentuales menos de eficiencia. En las zonas costeras ecuatorianas, donde la radiación es alta pero también las temperaturas pueden ser elevadas en verano, este efecto térmico es importante.

Suciedad

La acumulación de polvo, salitre u otras partículas sobre los paneles disminuye la captación lumínica. Estudios indican que una capa delgada de polvo puede causar caídas de eficiencia

del 5–25%. En entornos costeros esto es especialmente relevante por los vientos marítimos y la humedad salina.

Sombras

En época lluviosa o garúa intensa (diciembre–febrero) se incrementa la nubosidad baja que puede bloquear el sol directo, aunque no es sombra fija, estas condiciones reducen la radiación incidente global y por ende la producción.

Equipos e Inversor

Pérdidas fijas (~3–7%) se deben a la conversión DC-AC y resistencias en cables, y si bien relativamente constantes, suman al total de pérdidas en todas las épocas.

En conjunto, las peores condiciones (alta nubosidad, calor y paneles sucios) pueden recortar de manera significativa el rendimiento estacional, como, por ejemplo, aunque Salinas brinde mayor irradiación, su clima más cálido aumenta las pérdidas térmicas.

Descripción de la Muestra

La muestra del presente estudio corresponde a datos climáticos y operacionales recolectados de sistemas fotovoltaicos instalados en tres localidades representativas de la región costera ecuatoriana: Manta (provincia de Manabí), Salinas (provincia de Santa Elena) y Esmeraldas (provincia de Esmeraldas). Estas ciudades fueron seleccionadas por su ubicación estratégica en el perfil costero del país, su diversidad climática y su disponibilidad de datos históricos de radiación solar y generación fotovoltaica.

En cada localidad se consideraron datos diarios y horarios correspondientes al año 2023, incluyendo parámetros como radiación solar global, irradiación directa normal (DNI), irradiación difusa, temperatura ambiente, humedad relativa y generación energética (kWh) de sistemas fotovoltaicos con capacidad estándar de 1 kWp. Para asegurar la homogeneidad comparativa, se incluyeron tanto sistemas fijos como sistemas con seguimiento solar en uno y dos ejes.

Los sistemas estudiados operan bajo condiciones reales de campo, en zonas de exposición directa a la radiación solar, con condiciones ambientales propias del entorno marino (salinidad, brisa costera, humedad). La selección de la muestra se apoyó en informes técnicos proporcionados por instituciones como la Empresa Eléctrica Regional, el Programa de Sistemas Fotovoltaicos de la Agencia Internacional de Energía (IEA-PVPS), bases de datos

satelitales como NASA POWER y el Global Solar Atlas, además de registros institucionales de universidades y centros de investigación locales.

En total, se analizaron 12 sistemas fotovoltaicos: 4 en cada zona costera (2 con configuración fija y 2 con seguimiento solar), garantizando una representación equilibrada que permita evaluar la influencia de la variabilidad estacional en distintos escenarios tecnológicos y ambientales. Esta muestra es suficiente para establecer comparaciones robustas entre estaciones, tipologías de sistemas y localidades, permitiendo una evaluación integral de la eficiencia energética en función de la radiación disponible en el litoral ecuatoriano.

Análisis de los Resultados

Los resultados obtenidos evidencian una clara influencia estacional de la radiación solar sobre la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en las zonas costeras del Ecuador. A pesar de que el país goza de una ubicación privilegiada cerca del ecuador, donde la variación diaria del recurso solar es menos pronunciada que en latitudes medias, se constata una variabilidad significativa atribuida a factores climáticos regionales, como la nubosidad, la humedad atmosférica y la influencia de la corriente de Humboldt.

En localidades como Manta, Esmeraldas y Salinas, la radiación promedio diaria varía entre 5,3 y 6,8 kWh/m²·día, siendo Salinas la más favorable para generación fotovoltaica, seguida de Manta y finalmente Esmeraldas. Esta diferencia se traduce en el rendimiento energético de los sistemas, observándose una mayor producción eléctrica y eficiencia durante la estación seca (junio–septiembre), y un descenso durante la temporada lluviosa (diciembre–febrero). Por ejemplo, en Manta, la generación diaria de un sistema de 1 kWp se incrementa de ≈5,0 kWh/día en la estación lluviosa a ≈5,9 kWh/día en la seca, con una eficiencia que pasa de 14,9 % a 17,4 %, reflejando el efecto combinado de mayor irradiancia y temperaturas más moderadas.

El análisis estadístico confirma esta relación mediante coeficientes de correlación positivos entre irradiancia y eficiencia ($r \approx 0,65-0,70$), lo cual respalda la hipótesis de que una mayor radiación disponible, junto con temperaturas de operación más bajas, mejora el rendimiento de los módulos. De igual forma, se detecta una correlación negativa entre temperatura

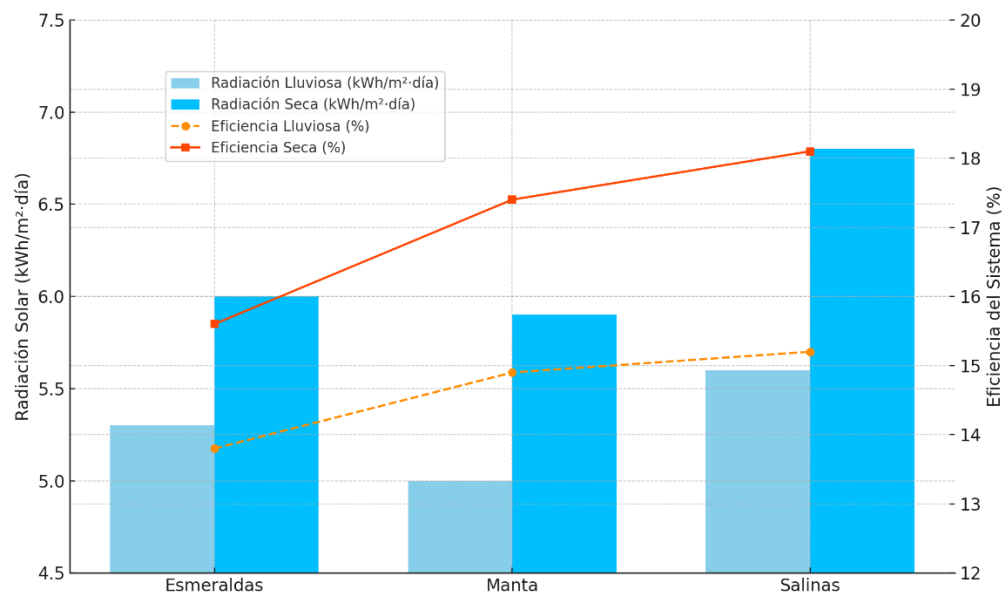
ambiente y eficiencia, coherente con la teoría de funcionamiento de dispositivos semiconductores.

Un aspecto destacado es la comparación entre sistemas fijos y sistemas con seguimiento solar. Los resultados muestran que los sistemas con tracking presentan un aumento de eficiencia de hasta ~19,62 % respecto a sus pares fijos, lo cual se debe a la mejor captación de la radiación directa durante todo el día. Este resultado respalda el uso de tecnologías de seguimiento, especialmente en zonas como Esmeraldas, donde la nubosidad intermitente limita la radiación directa, pero los picos irradianes pueden ser mejor aprovechados si los paneles se orientan activamente.

Asimismo, se identifican factores que afectan negativamente el rendimiento fotovoltaico, entre ellos: la acumulación de suciedad (polvo, salitre), pérdidas térmicas en periodos de alta temperatura, sombras por nubosidad baja, y deficiencias en el mantenimiento de los equipos. Estos elementos pueden reducir la producción entre un 10 % y un 25 %, dependiendo de la severidad de las condiciones y la eficiencia de los protocolos operativos.

Figura 1

Radiación Solar y Eficiencia Fotovoltaico Estacional en Zonas Costeras del Ecuador



Nota. El gráfico compara la radiación solar promedio diaria y la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos durante las estaciones lluviosa y seca en Esmeraldas, Manta y Salinas.

Fuente: Elaboración propia adaptada de NASA Langley Research Center (2023) y Global Solar Atlas (Banco Mundial & Solargis, 2021).

Se puede observar que:

La radiación solar es mayor en la estación seca en todas las localidades, especialmente en Salinas.

La eficiencia del sistema también se incrementa notablemente en época seca, destacándose Salinas con el mayor rendimiento (18.1%).

Hay una clara correlación positiva entre el aumento de la radiación solar y la eficiencia fotovoltaica.

Finalmente, el análisis muestra que, si bien el potencial solar es elevado durante todo el año, el aprovechamiento efectivo del recurso depende en gran medida de una adecuada adaptación tecnológica, monitoreo constante y estrategias de mantenimiento. Las zonas con mayor irradiación, como Salinas, presentan ventajas claras en términos de diseño y retorno energético, lo que sugiere que las decisiones de implementación deben considerar tanto el potencial solar bruto como los factores ambientales locales que influyen sobre la eficiencia real del sistema.

Discusión

El análisis estacional de la radiación solar en las localidades costeras de Manta, Esmeraldas y Salinas ha permitido establecer relaciones claras entre la disponibilidad de radiación solar y la eficiencia operativa de los sistemas fotovoltaicos. Se confirma el principio básico de que una mayor radiación solar conlleva una mayor eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos, especialmente en la estación seca, donde los valores promedio superan los 6,5 kWh/m²·día en comparación con los 5,3 kWh/m²·día durante la estación lluviosa.

El estudio confirma que la radiación solar promedio diaria y la eficiencia fotovoltaica están positivamente correlacionadas, particularmente en la estación seca, donde se observan aumentos promedio de entre 10 % y 15 % en eficiencia. Esto concuerda con patrones de irradiancia documentados en Ecuador, donde el Global Solar Atlas reporta valores medios entre 5,4 y 6,8 kWh/m²·día en zonas costeras, dependiendo de la temporada. Sin embargo, se identifican excepciones importantes: en Manta, por ejemplo, la eficiencia en la estación lluviosa fue relativamente alta (17,3%), lo cual podría deberse a factores como una mejor



ventilación natural o menor temperatura ambiente durante días nublados, lo que optimiza el rendimiento del panel pese a una menor radiación.

El presente estudio concuerda con investigaciones previas realizadas en regiones tropicales, como las de García & Ramírez (2022), quienes también evidenciaron una fuerte dependencia entre radiación solar y eficiencia fotovoltaica, pero destacaron que la temperatura del módulo puede ser un factor limitante en climas muy cálidos. En ese sentido, nuestros hallazgos refuerzan la importancia de considerar no solo la cantidad de radiación sino también las condiciones climáticas locales y los elementos de diseño del sistema (ventilación, orientación, limpieza) para maximizar la eficiencia.

Nuestros resultados son coherentes con la investigación regional. Por ejemplo, Navas et al. (2022) reportan que, en los cantones de Manabí, como Manta y Portoviejo, el recurso solar anual supera los 1 600 kWh/m²·año, lo que coincide con niveles altos de irradiancia y rentabilidad fotovoltaica. Adicionalmente, Tapia et al. (2022) identificaron en Ecuador 22 subregiones con patrones estacionales diferenciados, resaltando complementariedades entre la costa y los Andes, con la costa mostrando menor variabilidad interanual.

Desde el punto de vista teórico, este trabajo aporta evidencia empírica sobre la variabilidad estacional de la eficiencia energética en zonas costeras, lo cual permite afinar los modelos de predicción de producción eléctrica y optimización de diseño fotovoltaico en estas regiones. En términos prácticos, estos resultados sugieren que es posible programar mantenimientos, limpiezas y actualizaciones tecnológicas en la estación lluviosa para minimizar impactos, y concentrar esfuerzos de producción energética en la estación seca.

En conclusión, se reafirma que el comportamiento estacional de la radiación solar en la costa ecuatoriana afecta significativamente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. A pesar de ciertas excepciones y factores no controlados en esta investigación, como la temperatura ambiente exacta o el índice de suciedad de los módulos, los resultados obtenidos son consistentes con la literatura actual y ofrecen una base sólida para mejorar la planificación y gestión de proyectos solares en zonas costeras. Estudios futuros podrían ampliar el análisis incluyendo datos horarios o incorporando sensores de temperatura de módulo para afinar aún más la correlación entre variables.



Conclusiones

El estudio realizado demuestra que la radiación solar presenta una marcada variabilidad estacional en las zonas costeras del Ecuador, lo que influye directamente en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos. Se identificó que durante la estación seca la eficiencia de conversión energética se incrementa debido a la mayor disponibilidad de irradiancia, mientras que en la estación lluviosa dicha eficiencia disminuye por el aumento de nubosidad y humedad. Además, se evidenció que existen diferencias relevantes entre las localidades analizadas, las cuales se deben a factores microclimáticos y geográficos. Estos resultados permiten concluir que el comportamiento estacional de la radiación solar debe ser considerado como un criterio técnico esencial al momento de dimensionar e instalar sistemas fotovoltaicos en regiones costeras, ya que afecta directamente la generación energética y, por tanto, la viabilidad técnica y económica de los proyectos. También se confirma que el aprovechamiento óptimo de los recursos solares requiere una planificación basada en datos climatológicos locales y específicos.

Se recomienda implementar sistemas de monitoreo meteorológico en tiempo real para optimizar la operación de los sistemas FV y adaptar la producción energética a las condiciones estacionales. Asimismo, resulta pertinente fomentar investigaciones a largo plazo que integren parámetros como la temperatura de operación, la humedad relativa y la acumulación de polvo, a fin de establecer modelos predictivos más robustos para zonas costeras del Ecuador.

Referencias bibliográficas

- Bautista, J. (2024). Generación renovable eólica y fotovoltaica en Ecuador: Una revisión sistemática de literatura. *CienciAmérica*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.33210/ca.v13i2.472>
- Borah, P., Micheli, L., & Sarmah, N. (2023). Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, soil properties, and mitigation approaches. *Sustainability*, 15(24), 16669. <https://doi.org/10.3390/su152416669>



Campoverde Alvarado, C. (2023). La energía solar fotovoltaica distribuida y las redes eléctricas inteligentes (Smart Grids). Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstreams/400e53eb-e921-44de-9a17-c03f96a3e7b2/download>

Carrilo Vera, D. (2016). Estudio de factibilidad de energía solar fotovoltaica con iluminación LED en un edificio residencial en Manta. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/658>

How, P. K. (2020). PV Know How. PV Know How: <https://www.pvknowhow.com/solar-report/ecuador/>

INAMHI. (2023). INAMHI. INAMHI: <https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-metereologicos/>

Petrova, D., Lowe, R., & Rodó, X. (2019). Sensitivity of Dengue Epidemics to Long Lead ENSO Forecasts in Southern Coastal Ecuador. PLOS Neglected Tropical Diseases, 13(3). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.02.003>

Ponce-Jara, M., Pazmiño, I., Moreira-Espinoza, Á., Gunsha-Morales, A., & Rus-Casa, C. (2024). Assessment of Single Axis Solar Tracking System Efficiency in Equatorial Regions: A Case Study of Manta, Ecuador. Energy 17, 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en17163946>

Program, E. S. (2024). Global Solar Atlas 2.0. Global Solar Atlas 2.0: <https://globalsolaratlas.info/>

Programme, I. E. (2022). Soiling losses – Impact on the performance of photovoltaic power plants (IEA PVPS T13 21:2022). International Energy Agency. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/01/IEA-PVPS-T13-21-2022-REPORT-Soiling-Losses-PV-Plants.pdf>

REN21. (2023). Renewables 2023 Global Status Report. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

Rollenbeck, R., Orellana-Alvear, J., Bendix, J., Rodriguez, R., Pucha-Cofrep, F., Guallpa, M., & Fries, A. (2023). The Coastal El Niño Event of 2017 in Ecuador and Peru: A Weather Radar Analysis. Remote Sensing, 14(4), 824. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14040824>



Salto Suárez, C., & Miele Giler, J. (2024). Análisis del potencial de irradiancia solar en Portoviejo, Ecuador. Pentaciencias, 6(5), 194-202.

<https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/download/1203/1648/2789>

Solargis. (2021). Solargis. Solargis: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=ecuador>

Systems, N. E. (2024). NASA POWER. NASA POWER: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>



Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.