



Artículo de Investigación (evaluado por pares)

## Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá

Effect of Soiling on the Performance of Photovoltaic Modules in Bogotá

Fabián León-Vargas

Maira García-Jaramillo

Gelver Magín-Yara1

Alejandro Parra

**Como citar este artículo:** León-Vargas, F., García-Jaramillo, M., Magín-Yara, G., Parra, A., “*Effect of Soiling on the Performance of Photovoltaic Modules in Bogotá*”, INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.16601>

Fecha de envío: 01-07-2020

Modificado: 25-01-2021

Fecha de aceptación: 03-02-2021

Editor: Nelson L. Díaz Aldana.

Este documento es la versión final de autor del manuscrito aprobado para publicación, incorporando todas las revisiones surgidas durante el proceso de evaluación por pares. Puede haber diferencias entre esta versión y la versión final diagramada para publicación impresa. Se recomienda consultar la versión publicada si usted desea citar este artículo.

**La publicación final está disponible en:** <https://doi.org/10.14483/23448393.16601>

This document is the author's final manuscript version of the journal article, incorporating any revisions agreed during the peer review. There may be differences between this and the publisher's version. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite from this article.

**The final publication is available at:** <https://doi.org/10.14483/23448393.16601>

Research/Review/Case-study/Short/Opinion paper

## Effect of Soiling on the Performance of Photovoltaic Modules in Bogotá

*Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá*

**Fabián León-Vargas<sup>1\*</sup>, Maira García-Jaramillo<sup>2</sup>, Gelver Magín Yara<sup>1</sup>, Alejandro Parra<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Antonio Nariño (Bogotá, Colombia), <sup>2</sup> Universidad EAN (Bogotá, Colombia), <sup>3</sup> Universidad de la Salle (Bogotá, Colombia).

\*correspondence e-mail: fabianleon@uan.edu.co

Received: 01/07/2020 - Modified: 25/01/2021 - Accepted: 03/02/2021

### Abstract

**Context:** This study analyzes the soiling effect on the energy efficiency of two photovoltaic generation system configurations: one fixed and one mobile (with solar tracking).

**Method:** A support system and output power measurement adapted for each configuration was implemented. Data was collected during two months in Bogotá. This analysis considered the average power obtained in two 50 W polycrystalline photovoltaic modules integrating each configuration. A test module was assigned for applying a cleaning protocol in each configuration, and the remaining module was assigned as a control module. This result was used in a pre-feasibility analysis for energy self-sufficiency of an average, middle-income household.

**Results:** A regular cleaning protocol increases the energy productivity of each analyzed photovoltaic system in 3,87 % and 7,23 %, according to its configuration. Additionally, at the economic level, this increase in productivity represents the year-prior amortization of a photovoltaic system for energy self-sufficiency, regardless of the type of configuration used.

**Conclusions:** A positive impact on the energy efficiency of the two photovoltaic configurations analyzed was found under a regular cleaning protocol in Bogotá. This benefit increases the profitability that could be obtained from investing a system for the energy self-sufficiency of an average family.

**Keywords:** energy efficiency, photovoltaic system, solar tracker, cleaning protocol, soiling, pre-feasibility

**Acknowledgements:** This work has been funded by Universidad Antonio Nariño through project No. 2018230. The authors would like to thank Universidad EAN for supporting this study.

### Resumen

**Contexto:** Este estudio analiza el efecto de la suciedad en la eficiencia energética de dos configuraciones de sistemas de generación fotovoltaica: una fija y una móvil (con seguimiento solar).

**Método:** Se implementó un sistema especial de soporte y medición de la potencia de salida adaptado para cada configuración. Se recopilaron datos durante dos meses en Bogotá. El análisis utiliza la potencia promedio de dos módulos fotovoltaicos policristalinos de 50 W que forman parte de cada configuración. Se asignó un módulo de prueba para la aplicación de un protocolo de limpieza, y el otro fue asignado como módulo control. A partir de este resultado se analizó la prefactibilidad para la autosuficiencia energética de un hogar promedio de ingreso medio.

**Resultados:** La aplicación de un protocolo de limpieza regular aumenta la productividad energética de cada sistema fotovoltaico entre un 3,87 % y un 7,23 %, de acuerdo con su configuración. A nivel económico, este incremento representa la amortización del sistema fotovoltaico para autosuficiencia energética un año antes, sin importar la configuración empleada.

**Conclusiones:** Se encontró un impacto positivo en la eficiencia energética bajo un protocolo de limpieza regular en Bogotá. Este beneficio permite aumentar la rentabilidad obtenida de la inversión en un sistema para autoabastecimiento energético de una familia promedio.

**Palabras clave:** eficiencia energética, sistema fotovoltaico, seguidor solar, protocolo de limpieza, suciedad, prefactibilidad

**Agradecimientos:** Este trabajo fue financiado por la Universidad Antonio Nariño a través del proyecto No. 2018230. Los autores agradecen el soporte dado por la Universidad EAN en este trabajo.

### Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: León, F., García, M., Magín, G., Parra, A.: *Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá*. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021 pp:pp. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.16601>

## **T1** Introducción

La generación de energía eléctrica convencional en Colombia se basa principalmente en hidroeléctricas y sistemas térmicos a base de gas y carbón [1], es decir, recursos no renovables que, además de su deterioro, desencadenan problemas ambientales. Esta situación plantea la necesidad de hacer uso de fuentes de generación de energía eléctrica con un menor impacto ambiental.

En Colombia los recursos energéticos renovables, como el viento y la radiación solar, tienen una mínima participación en la generación de energía eléctrica a nivel nacional (0,2 %) [2], lo que evidencia un gran potencial de crecimiento en el sector, además del beneficio ambiental que representa.

De acuerdo con la subdirección de energía eléctrica, oficina adscrita a la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) de Colombia, en su informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano del mes de agosto de 2018, la capacidad total instalada de generación del país es de 17.720 MW [3]. Esta misma fuente establece que la generación de energía eléctrica de proyectos de tipo solar fotovoltaico (FV) es de 9,8 MW, es decir el 0,06 % de la capacidad total de generación del país, una cifra significativamente baja si se compara con otros escenarios mundiales.

El mercado solar fotovoltaico aumentó 12 % en 2019 a un récord de 115 GW (corriente continua), para un total de 627 GW [4]. A finales de ese mismo año, había suficiente capacidad en todo el mundo para producir un estimado de 2,8 % de la generación mundial de electricidad a partir de energía solar FV. En Europa la implementación de grandes proyectos de generación solar FV se ha dado principalmente en países como Italia (8,6 %), Grecia (8,3 %) y Alemania (8,2 %) [4]. En Latinoamérica, Chile es pionero en este tipo de energía (8,1 %); sin embargo, otros países han iniciado una rápida expansión en la generación de energía solar FV. Los principales instaladores de la región fueron Brasil (agregando 2 GW), México (casi 2 GW) y Argentina (0,5 GW). Otros países pusieron en línea una capacidad significativa, incluyendo a Colombia, que encargó una planta de 86 MW, y Jamaica, que completó la instalación de energía solar fotovoltaica más grande del Caribe (51 MW), se espera que la planta proporcione la electricidad de menor costo de la isla [4].

A pesar de las ventajas ambientales atribuibles a los sistemas de generación FV, existen

preocupaciones relacionadas con su desempeño real [5]. Si bien la eficiencia energética de estos sistemas suele ser del 15 % al 20 %, esta puede verse afectada considerablemente por condiciones ambientales ajenas a su funcionamiento [5]. En particular, el polvo puede reducir la eficiencia de los módulos FV [6], tal como lo demuestran algunos estudios que reflejan una reducción del 7 % en su eficiencia [7]. Sin embargo, dichas afectaciones pueden ser atenuadas gracias a protocolos de mantenimiento regular basados en índices de criticidad establecidos para ello [8]. Mani *et al.* en 2010 revisaron ciclos de limpieza para mitigar el impacto de la suciedad, recomendando la limpieza semanal durante las estaciones secas y el lavado diario para la acumulación intensiva de polvo [9].

Con el fin de proporcionar información relacionada con el desempeño ante la suciedad que presentan los sistemas de generación FV bajo condiciones ambientales propias de la ciudad de Bogotá, y considerando la falta de estudios similares a la fecha, en este trabajo se evalúa la eficiencia energética de dos configuraciones de generación FV: una fija y una móvil. A partir de este resultado, se plantea un análisis de prefactibilidad de la inversión de un sistema de generación FV a pequeña escala, diseñado para la autosuficiencia energética de un hogar promedio de Bogotá [10]. En este análisis se tiene en cuenta el costo de generación de energía y el tiempo de amortización correspondiente de la inversión.

## **T1** Materiales y métodos

La determinación del efecto de la suciedad en el desempeño de paneles FV se basa en la comparación directa de la eficiencia eléctrica encontrada en sistemas con mantenimiento versus sistemas sin mantenimiento, operando de forma simultánea, y bajo las mismas condiciones de exposición ambiental en la ciudad de Bogotá.

Los sistemas FV analizados en este estudio corresponden a dos configuraciones específicas: una fija y una móvil, es decir, sin seguimiento solar y con seguimiento solar. Para ello se diseñó e implementó una estructura de soporte principal que integra ambas configuraciones, en la que se acondicionó un sistema de medición de potencia que recolectó información durante dos meses de funcionamiento.

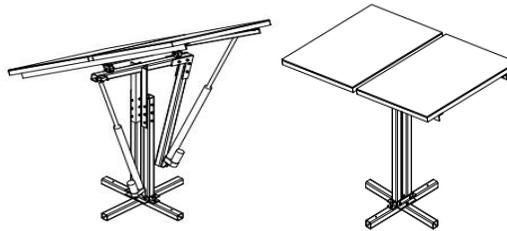
En la configuración móvil, el movimiento es controlado por un sistema de seguimiento solar automático, mientras que en la configuración fija se establece una inclinación estática de 10° orientada hacia el ecuador terrestre.

A continuación se presentan aspectos de diseño de la estructura soporte de ambas configuraciones, las consideraciones del protocolo de mantenimiento y el planteamiento económico usado en este estudio.

## **T2 Estructura soporte**

La estructura de medición está basada en el diseño conceptual de la Figura 1. Cada configuración incluye dos módulos FV policristalinos de 50 W independientes, entre los cuales, solo uno de ellos recibe un protocolo de limpieza regular.

En la configuración móvil, Figura 1 (izq.), se implementa un sistema de actuación de doble eje conformado por actuadores lineales de 16" de desplazamiento y capacidad de carga de 1.500 N, el cual fue programado con un intervalo de tiempo de movimiento de dos minutos.



**Figura 1.** Modelo conceptual de la estructura soporte utilizada en la configuración móvil (izquierda) y fija (derecha).

## **T2 Protocolo de limpieza**

La periodicidad de la limpieza de los módulos, es decir, el protocolo utilizado en este estudio, se basa en un índice de criticidad que forma parte del estándar AS/NZ 4509-2:2010 de Nueva Zelanda [7]. Dicho índice establece que, para sistemas no conectados a la red eléctrica convencional, se debe realizar una limpieza de módulos FV cada vez que se detecta una pérdida del 2 % de su potencia nominal.

Teniendo en cuenta que los módulos usados en este estudio son de 50 W, dicha pérdida corresponde a 1 W. En una prueba preliminar se determinó que, para la ubicación geográfica de prueba, dicha condición de criticidad se cumplía aproximadamente cada cinco días.

El proceso de limpieza consistió en la aplicación de agua y secado con paños suaves sobre la superficie de los paneles FV. Este proceso se aplicó en horas de baja irradiancia para evitar cambios bruscos de temperatura en el panel [11].

## T2 Análisis económico

El análisis económico realizado se centra en la rentabilidad obtenida con cada configuración a través del indicador tiempo de amortización (TA) para sistemas de generación FV, ver Ecuación 1.

$$TA = \frac{CE+CI}{12 \cdot E_R \cdot C_{ref} - ARC} \quad (1)$$

donde  $CE$  es el costo total de los equipos,  $CI$  es el costo de instalación,  $C_{ref}$  es el costo de referencia por kWh,  $ARC$  es el costo anual recurrente, y  $E_R$  es la energía mensual generada.

Una descripción detallada del uso de este indicador para sistemas FV, y otros indicadores relevantes como el LCOE, se pueden hallar en [10]. Para este estudio, se consideran las diferencias estimadas en la energía generada  $E_R$  en función de la eficiencia energética obtenida con cada una de las configuraciones analizadas. De igual forma, en los cálculos realizados, se tiene en cuenta la aplicación de incentivos económicos establecidos por la ley 1715 de 2014.

## T1 Resultados

### T2 Sistema de medición

El sistema de medición fue ubicado en la zona sur de la ciudad de Bogotá (4° 35' 56" Latitud Norte), en un área que incluye vías de transporte público y una estación meteorológica distrital, ver Figura 2.



**Figura 2.** Ubicación del sistema de medición.

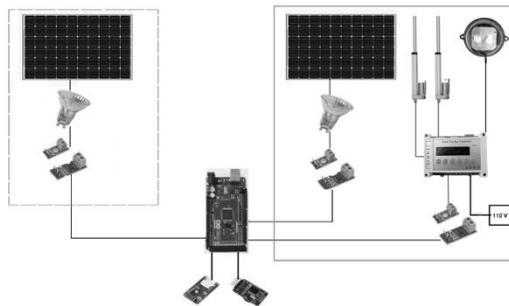
En la Figura 3 se observa el resultado de la construcción de la estructura soporte que implementa ambas configuraciones de medición. Esta estructura fue hecha en aluminio de

aleación 6061-T6, en tubo cuadrado de 1½” (38,1 mm) y espesor 1/16” (1,5mm).



**Figura 3.** Sistema de medición montado sobre una estructura soporte de aluminio.

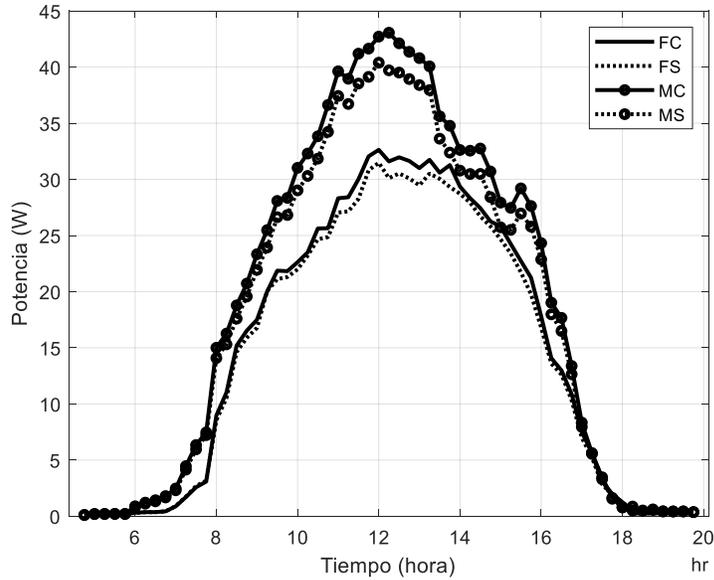
La potencia de salida de cada configuración fue medida con un sistema de adquisición de datos basado en la plataforma Arduino, utilizando cuatro sensores de corriente DS3231 y cuatro sensores de voltaje FZ0430, ver Figura 4. Los datos de voltaje y corriente obtenidos en cada módulo FV fueron medidos cada dos minutos sobre una carga resistiva de 50 W.



**Figura 4.** Esquemático del sistema de medición de potencia de bajo costo basado en la plataforma Arduino.

## **T2** Eficiencia energética

La Figura 5 presenta los resultados de la potencia promedio diaria obtenida de la información recopilada durante dos meses de medición continua.



**Figura 5.** Potencia diaria promedio obtenida con cada configuración. Línea punteada: config. fija sin limpieza (FS). Línea sólida: config. fija con limpieza (FC). Línea punteada con o: config. móvil sin limpieza (MS). Línea sólida con o: config. móvil con limpieza (MC).

En la Tabla I se muestra el valor de potencia promedio global obtenida de acuerdo con el tipo de configuración (móvil o fija), y aplicación del protocolo de limpieza.

**Tabla I.** Potencia promedio obtenida con cada configuración

Configuración n	Con limpieza (W)	Sin limpieza (W)
Móvil	23,68	22,08
Fija	18,20	17,52

A partir de estos resultados, se obtiene la productividad relativa al uso del protocolo de limpieza de acuerdo con la Ecuación 2.

$$\delta = \frac{P_C - P_S}{P_S} * 100 \tag{2}$$

donde  $P_S$  corresponde a la potencia del módulo sin limpieza, y  $P_C$  a la potencia del módulo con limpieza.

A partir de la Ecuación 2 se observa un incremento de 7,23 % y 3,87 % en la productividad energética de la configuración móvil y fija, respectivamente, al aplicar el protocolo de limpieza

respecto a no hacerlo.

Por su parte, al comparar la eficiencia relativa entre las configuraciones móvil y fija, se encontró un incremento de 30,09 % en la potencia de la configuración móvil respecto de la fija, aplicando limpieza en ambos casos. Sin limpieza, se encontró un incremento de 26,02 % en la potencia de la configuración móvil respecto de la fija. Esta diferencia en la eficiencia relativa entre ambas configuraciones es consistente con estudios similares [12].

## 12 Prefactibilidad

Para el cálculo del indicador de tiempo de amortización de la Ecuación 1, se estimó la energía real generada de cada configuración, teniendo en cuenta las diferencias de potencia promedio encontradas en los distintos casos abordados en este estudio.

La energía generada mensualmente  $E_R$  en cada caso se estima con base en la energía utilizada en los cálculos económicos del estudio [10], es decir, 191,82 kWh, asociada con la configuración fija sin protocolo de limpieza. Esto implica que en los demás casos la energía generada será superior, teniendo en cuenta el porcentaje relativo incremental de las potencias presentadas en la Tabla I.

El valor de  $CI$  y  $ARC$  corresponde al 10 % y 1 % del valor de  $CE$ , respectivamente. El valor de  $C_{ref}$  y  $CE$  usado está basado en el cálculo de un estudio de prefactibilidad previo [10]; sin embargo, para la configuración móvil, se incluye además un sistema de seguimiento solar automático, con un precio de mercado estimado de €660 (sin IVA) [13], que cumple con las características de carga requeridas.

En la Tabla II se presenta la estimación de la energía total generada mensualmente en cada caso; sin embargo, para la configuración móvil se consideró un descuento del 3,5 %, debido al consumo energético requerido por el sistema de seguimiento [14]. De igual forma, en la Tabla II se presentan los valores del indicador tiempo de amortización de la inversión para cada caso, asumiendo la aplicación de los incentivos de la Ley 1715 de 2014.

**Tabla II.** Estimación de la energía real generada y tiempo de amortización en cada caso

Configuración	$E_R$ (kWh)	$TA$ (años)
Fija sin limpieza	191,82*	15,2
Fija con	199,24	14,5

limpieza		
Móvil sin limpieza	235,03	12,1
Móvil con limpieza	252,55	11,1

\* Tomado de [10]

## **T1** Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio permiten demostrar la importancia atribuible a un buen protocolo de mantenimiento/limpieza sobre los sistemas de generación FV. Sin embargo, es preciso considerar algunas limitaciones presentes en su desarrollo.

La duración del estudio, si bien es corta para un análisis definitivo, proporciona una aproximación del desempeño esperado, el cual es consistente con resultados de estudios similares que analizan la productividad energética de estos sistemas en un año de funcionamiento bajo condiciones de suciedad en los módulos FV [15].

La diferencia encontrada en los porcentajes de eficiencia energética obtenida al aplicar el protocolo de limpieza en cada configuración fue distinta, siendo de aproximadamente la mitad para el caso fijo respecto al móvil (3,87 % vs 7,23 %). Esto quiere decir que la configuración fija sufrió en menor medida el efecto de la suciedad ambiental en su productividad energética. Una razón que podría explicar este fenómeno es el efecto de limpieza que tienen las lluvias. Durante los dos meses de recolección de datos se presentaron lluvias frecuentes en la zona, y debido a la inclinación invariable de 10° de la configuración fija, el flujo del líquido pudo desplazar con mayor eficiencia la suciedad superficial de los módulos respecto a la configuración móvil.

La ubicación del estudio se limitó a la ciudad de Bogotá, dado que se trata de la principal urbe del país, lo que proporciona la facilidad de acceso que se encontró para el registro de la información. Además, en la elección de la ubicación utilizada al interior de la ciudad se tuvo en cuenta una zona de alta exposición a contaminación ambiental por polución, debido a su cercanía con una vía altamente transitada por vehículos de transporte público y, que a su vez, está expuesta al polvo de vías sin asfalto apropiado localizadas a su alrededor.

Si bien la configuración móvil, en general, demuestra prestaciones de eficiencia superiores a su contraparte fija, es importante considerar el espacio de instalación

requerido por el sistema de seguimiento solar; el cual ocuparía condiciones de instalación adicionales que limitan aún más el alcance de viviendas apropiadas para una aplicación urbana de este sistema.

El objetivo de incorporar un análisis básico de prefactibilidad en este estudio fue mostrar el impacto económico estimado que trae consigo la incorporación de un protocolo de mantenimiento para las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá. El indicador tiempo de amortización, utilizado en este estudio, podría ser complementado con otros indicadores económicos, como *Levelized Cost of Energy* (LCOE), para establecer con mayor veracidad el impacto de estos protocolos en configuraciones fijas o móviles de sistemas PV.

En este estudio no se consideró el impacto económico asociado con la aplicación de los incentivos propios de la ley 1715 en sistemas renovables. Sin embargo, se debe tener presente que, de no aplicarse efectivamente dichos incentivos, el tiempo de amortización de la inversión, para las condiciones consideradas en el presente estudio, podría incrementarse en promedio cinco años en cada caso [10].

## **T1** Conclusión

Los sistemas FV analizados presentan un deterioro en la productividad energética debido a la suciedad presente en el ambiente de la ciudad de Bogotá. La eficiencia energética de cada configuración se ve afectada en diferente medida, presentándose una reducción del 3,87 % para el caso fijo, y del 7,23 % para el caso móvil. Este impacto de la suciedad en la productividad energética de los sistemas FV analizados representa un aumento en el tiempo de amortización de la inversión de aproximadamente un año para cada configuración. Estas técnicas de mantenimiento preventivo pueden contrarrestar el efecto de la suciedad a través de protocolos de limpieza que conducirían a un mejor desempeño de los sistemas FV y por ende a un mayor beneficio económico de los mismos.

## **T1** Referencias

[1] G. Carvajal-Romo, M. Valderrama-Mendoza, D. Rodríguez-Urrego y L. Rodríguez-Urrego, “Assessment of Solar and Wind Energy Potential in La Guajira, Colombia: Current Status, and Future Prospects”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100531>

- [2] XM Compañía de Expertos en Mercados. “Descripción del sistema eléctrico colombiano”. <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano”, agosto, 2018. [http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2018/Informe\\_de\\_variables\\_Ago\\_2018.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2018/Informe_de_variables_Ago_2018.pdf)
- [4] REN21, “Renewables 2020 Global Status Report”, 2019. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- [5] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad y S. Hajighorbani, “Power Loss Due to Soiling on Solar Panel: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307-1316, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>
- [6] M. M. Fraga, B. L. de Oliveira Campos, T. B. de Almeida, J. M. Fraga da Fonseca y V. de Freitas Cunha Lins, “Analysis of the Soiling Effect on the Performance of Photovoltaic Modules on a Soccer Stadium in Minas Gerais, Brazil”, *Solar Energy*, vol. 163, pp. 387-397, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.025>
- [7] S. A. M. Said, “Effects of Dust Accumulation on Performances of Thermal and Photovoltaic Flat-Plate Collectors”, *Applied Energy*, vol. 37(1), pp. 73-84, 1990. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(90\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0306-2619(90)90019-A)
- [8] Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4509.2:2010. <https://www.standards.govt.nz/shop/asnzs-4509-22010/>
- [9] M. Mani y R. Pillai, “Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Research Status, Challenges and Recommendations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14 (9), pp. 3124-3131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- [10] F. León-Vargas, M. García-Jaramillo y E. Krejci, “Pre-Feasibility of Wind and Solar Systems for Residential Self-Sufficiency in Four Urban Locations of Colombia: Implication of New Incentives Included in Law 1715”, *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 1082-1091, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.087>
- [11] M. Campos. *Planta solar fotovoltaica de 500kw sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla*. Manual de mantenimiento. Escuela Técnica Superior

de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2012.  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5074/fichero/Volumen+5%252F9.+Manual+de+Manteminiento.pdf>

[12] J. A. Pelayo, A. Soto, F. Ramos, y B. Guzmán, “Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo”, *CIBA: Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, vol. 7(13), pp. 105-129, 2018. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.76>

[13] SAT CONTROL, Solar Tracking Systems: Dual Axis Solar Trackers, s.f.  
<http://www.solar-motors.com/gb/solar-trackers/dual-axis-sun-trackers-g78.shtml>

[14] G. J. Prinsloo y R. T. Dobson. *Solar Tracking*. Stellenbosch, Sudáfrica: SolarBooks, 2015.

[15] R. R. Cordero, A. Damiani, D. Laroze *et al.*, “Effects of Soiling on Photovoltaic (PV) Modules in the Atacama Desert”, *Scientific Reports*, vol. 8, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32291-8>

---

### **Fabián León-Vargas**

Doctor en Tecnología de la Universidad de Girona (España); Magíster en Informática Industrial y Automática de la Universidad de Girona (España); Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander; Docente de la Universidad Antonio Nariño; Líder del grupo de investigación REM de la Universidad Antonio Nariño.

Correo electrónico: [fabianleon@uan.edu.co](mailto:fabianleon@uan.edu.co)

---

### **Maira García-Jaramillo**

Doctora en Tecnología de la Universidad de Girona (España); Magíster en Tecnología de la Información de la Universidad de Girona (España); Ingeniera de Sistemas de la Universidad Francisco de Paula Santander; Docente de la Universidad EAN; Líder del Grupo de Investigación y Desarrollo Tecnológico ONTARE.

Correo electrónico: [magarcia@universidadean.edu.co](mailto:magarcia@universidadean.edu.co)

---

### **Gelver Magín Yara**

Ingeniero Electromecánico de la Universidad Antonio Nariño.

Correo electrónico: [gmagin798@uan.edu.co](mailto:gmagin798@uan.edu.co)

---

**Alejandro Parra**

Doctor en Economía Internacional y Desarrollo de la Universidad Complutense de Madrid (España);  
Magíster en Economía Internacional y Desarrollo de la Universidad Complutense de Madrid (España);  
Economista de la Universidad de la Salle; Docente de la Universidad de la Salle; pertenece al grupo  
de investigación Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental CLIMA.

Correo electrónico: [alparra@unisalle.edu.co](mailto:alparra@unisalle.edu.co)