

Propuesta de un modelo energético para Venezuela basado en el potencial solar y la producción de energía eléctrica mediante la fotosíntesis de las plantas.

Raymond Daniel Rodríguez Martínez¹

¹Departamento de Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Metropolitana, 1073 Caracas, Venezuela.

Resumen

Resulta imperativo desarrollar un modelo energético sustentable ante la tendencia actual orientada hacia la descarbonización de los sectores a nivel mundial. Para ello, se tomó a Venezuela como referencia para plantear un modelo energético centrado en aprovechar la fotosíntesis de las plantas mediante celdas de combustible microbianas-vegetal junto con un sistema agrofotovoltaico a modo de potenciar la producción energética y agropecuaria. La producción de energía a partir de las celdas fue estimada empleando una densidad de potencia promedio de 264 mW/m² sobre el 4% de las áreas destinada a los cultivos en toda la región venezolana, obteniéndose una producción anual de 19.889 GWh/año, mientras la producción energética del sistema agrofotovoltaico fue modelado mediante el software PVsyst sobre el 50% del área empleada para las celdas distribuidas a lo largo de los estados Anzoátegui, Guárico, Monagas y Portuguesa en función de sus condiciones meteorológicas, irradiación solar y actividad agropecuaria, resultado en 3.703.417 GWh/año. El sistema en conjunto resultante demostró ser capaz de cubrir hasta más de diez veces la capacidad de generación eléctrica instalada a nivel nacional, y junto con la gran escalabilidad de las celdas de combustible microbianas, se demuestra que Venezuela posee un alto potencial para la producción y distribución de energía limpia.

Palabras claves: energía solar, celda de combustible microbiana-vegetal, esquema energético, agricultura, Venezuela.

Introducción

El sector energético es a grosso modo un contribuyente clave del cambio climático, siendo responsable directa e indirectamente de hasta dos terceras partes de las emisiones de gases de efecto invernadero (Díaz et al., 2020), y a su vez es uno de los más afectados por él debido a cuan aunado se encuentra dicho sector a la explotación de los combustibles fósiles, los cuales representan el 89% de las emisiones de gases invernaderos (Olivier, 2022), propiciando la necesidad de implementar nuevas fuentes conocidas como renovables. Aunque las fuentes renovables abarcan la energía proporcionada directa e indirectamente por el sol y por tanto poseen una emisión cero de carbono (Ellaban et al. 2014, p.749), el uso de los combustibles fósiles se encuentra inmiscuido en la cotidianidad afectando la temperatura del planeta debido a la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales impulsan fenómenos sumamente mortíferos para todas las especies del planeta (World Wildlife Fund [WWF], 2022, p. 4). En función de esto, la tendencia actual se encuentra orientada hacia la neutralidad del

carbono en cuanto al sector industrial, el sector energético y el económico, de modo que los entes gubernamentales, e inclusive los bancarios, cada vez le dan mayor prioridad a los proyectos y empresas alineadas con la preservación del ambiente y la emisión cero de carbono (Hernández, 2022).

La presente investigación tiene como objeto exponer el potencial de producción energético de la región venezolana basado en un modelo sustentable y con emisión cero de carbono. Venezuela, con la finalidad de salvaguardar su economía centrada en el petróleo y mantenerse en el radar energético internacional, debe ir en miras de una transición energética, especialmente ante la prospectiva de una participación del 65% las energías renovables para el 2030 y del 90% para el 2050 sobre la generación de energía eléctrica a nivel mundial con tal de evitar un aumento del 1,5°C (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022, p.61).

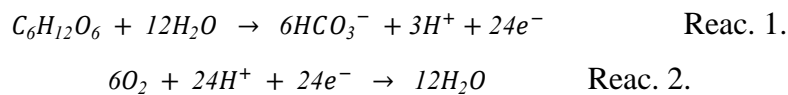
Venezuela como modelo energético

Venezuela tiene potencial para ser líder en energía solar (Hernández, 2022). De hecho, de acuerdo con el Global Atlas de la Agencia Intencional de las Energías Renovables, el potencial solar promedio de Venezuela ronda los 236 W/m². Sin embargo, la energía solar es una fuente de energía intermitente, por lo que implementar un modelo energético basado netamente en ella supondría grandes desafíos dada la necesidad de abastecer la demanda de carga base, e implicaría sobredimensionar el esquema para suplir el consumo de electricidad (Sepulveda et al., 2018, p.2416). Por ello, es imperativo plantear un modelo sinérgico integrado por diversas fuentes con el fin de mitigar el efecto de intermitencia.

Por otra parte, la región venezolana también posee potencialidades para la agricultura tropical, teniendo tierras aptas para la agricultura vegetal en toda su extensión (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s.f.). En realidad, Venezuela posee 215.000 km² de superficie destinadas a actividades agrícolas y 462.720 km² de áreas forestales, representando el 76,83% de la superficie total de tierra (FAO, 2020). En este sentido, la gran disponibilidad de tierra permitiría plantear un modelo energético basado en energía solar junto con la producción de electricidad a partir de la fotosíntesis de las plantas mediante celdas de combustible microbianas-vegetal, o P-MFCs por sus siglas en inglés.

Una P-MFC es un biorreactor donde se emplean microorganismos para transformar un sustrato biodegradable en electricidad gracias al aprovechamiento de los compuestos orgánicos liberados por la fotosíntesis de plantas vivas desde su sistema de raíces hacia la tierra, los cuales

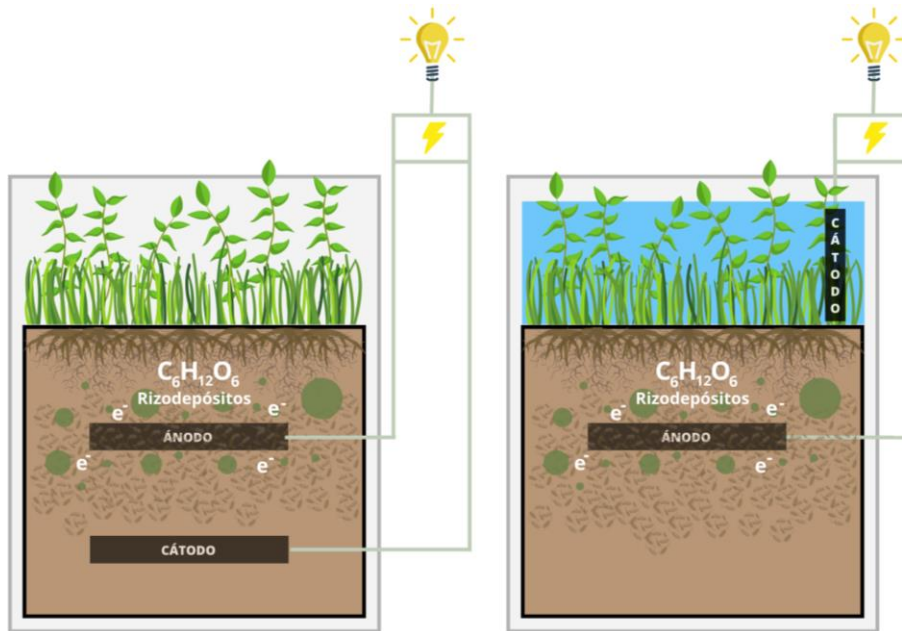
son denominados como rizodepósitos y pueden representar hasta más del 40% de la actividad fotosintética de planta (Strick et al., 2008, p.872). Estos rizodepósitos son empleados por los microorganismos presentes en la tierra para sintetizar su propio alimento a la vez que liberan electrones en el medio, los cuales son captados por un ánodo y un cátodo, generalmente de grafito, ubicados a 5 y 30 cm por debajo de las raíces de las plantas (Gurram y Kothapalli, 2017, p.149), y cuyas semirreacciones de oxidación y reducción se muestran respectivamente a continuación (Rodríguez et al, 2021):



Aunque las especies óptimas para una P-MFC suelen ser aquellas capaces sobrevivir y crecer en condiciones de encharcamiento (Helder et al, 2010, p.3541), todas las plantas pueden ser fuente de energía en mayor o menor energía sin comprometer su integridad, incluyendo aquellas especies de interés comercial (Rodríguez et al., 2021). De hecho, se recomienda emplear especies capaces de crecer con las raíces sumergidas en la tierra y utilizar plantas para uso en interiores cuando se planee colocar el sistema P-MFC en ambientes internos, o especies locales habituadas al aire libre cuando se planee colocar el sistema en ambientes exteriores (Gurram y Kothapalli, 2017, p.148). La figura 1 muestra los esquemas típicos de P-MFCs basados en un único compartimiento empleando especies con condiciones de crecimiento típicas o condiciones de encharcamiento.

Figura 1.

Esquemas de P-MFCs empleando especies de plantas con y sin condiciones de encharcamiento



Bajo condiciones de laboratorio la densidad de potencia de una P-MFC ha alcanzado un valor 440 mW/m^2 y en ambientes exteriores se han evidenciado 88 mW/m^2 bajo la influencia de factores externos (Helder et al., 2012, p.1). Sin embargo, dichas bajas densidades de potencia pueden ser sopesadas gracias al continuo funcionamiento de las P-MFCs durante las 24 horas del día (Rojas et al., 2018, p.37), y su rendimiento solo se ve afectado por el congelamiento y la supervivencia de las plantas proveedoras del sustrato (Helder, 2012, p.86), las cuales pueden ser resembradas cuando se requiera. Por tanto, en miras de un aprovechamiento espacial eficiente, el mecanismo de las P-MFCs se beneficiaría ampliamente al implementarse junto con un sistema agrofotovoltaico, o APV por sus siglas en inglés, en donde se disponen los paneles fotovoltaicos a dos metros sobre los cultivos y con cierta separación entre ellos para evitar el sombreado excesivo (Weselek et al. 2019, p.3). Pese a eso, la sombra proveída por el sistema APV resulta beneficiosa para las P-MFC en tanto se desfavorece la evaporación del agua sobre los cultivos, especialmente en aquellas especies habituadas a condiciones de encharcamiento para su crecimiento. De hecho, se ha observado un aumento del 90% en la biomasa sobre las áreas debajo de los paneles fotovoltaicos e inclusive, los cultivos fueron 328% más eficientes en cuanto al regado con agua (Adeh et al., 2018, p.1).

Materiales y métodos

La energía generada por las P-MFCs estuvo dada por la ecuación 1, en la cual se consideraron 24 horas de funcionamiento durante los 365 días del año y se empleó una densidad

de potencia promedio de 264 mW/m² debido a la presencia del sistema APV y al clima tropical donde no existen condiciones de congelamiento de acuerdo a la ubicación geográfica de Venezuela (Fundación de Empresas Polar, 2007, p.360). El área de producción energética del esquema correspondió al 4% de las tierras destinadas para la producción agrícola en Venezuela, resultando en 8.600 km².

$$\text{Energía} = \text{Densidad de Potencia (W/m}^2\text{)} \times \text{Área(m}^2\text{)} \times 24 \text{ (h/día)} \times 365 \text{ (día/año)} \quad \text{Ecu. 1.}$$

La producción de la energía agrofotovoltaica se modeló bajo condiciones de prueba estándar basado en un sistema conectado a la red mediante el software PVsyst y abarcó el 50% del área destinada para las P-MFCs debido al espaciamiento entre los paneles y dado que todas las especies no son aptas para crecer en condiciones de sombra, resultando en 4.300 Km² distribuidos a lo largo de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, y Portuguesa como zonas de localización. Los estados Anzoátegui, Guárico y Monagas, además de poseer un alto potencial solar (Hernández, 2022), presentan suelos con alta calidad para los cultivos y cuentan con la disponibilidad para su desarrollo (Fundación de Empresas Polar, 2007, p. 259, 323, 971), mientras que el estado Portuguesa fue seleccionado debido a sus altas actividades agrícolas y bajo el principio de exponer su potencial de producción energética (Fundación de Empresas Polar, 2007, p.836). En este sentido, las condiciones meteorológicas de cada región fueron proveídas por la base de datos Meteonorm 8.1 integrada en el software fotovoltaico.

Para la simulación se tomó como referencia a LONGi Solar, considerado como el mayor fabricante de células solares del mundo (Renewables.Digital, 2023), y se seleccionó el panel LR5-72HBD-555M G2 de 555 Wp bifacial a modo de aprovechar la incidencia directa del sol y la radiación reflejada por la tierra en función del albedo de los cultivos. Se estableció un ángulo de azimut óptimo de 0° y una inclinación de 10°. Adicionalmente, se ignoraron las pérdidas por suciedad debido a la elevación de los paneles con respecto al suelo y se estipularon pérdidas auxiliares definidas en función del inversor. En cuanto a los inversores, se seleccionó el inversor SG2500-HV-20 de 2500 kW fabricado por Sungrow, la segunda mayor gran marca de inversores con una participación del 21% en el mercado (Wood Mackenzie, 2022), y su selección se basó en función de una compatibilidad adecuada con respecto a la cantidad de módulos en serie y al número de cadenas pertinentes para el correcto funcionamiento de la simulación bajo las especificaciones establecidas y con la restricción de pérdidas por sobrecarga no mayor al 3%.

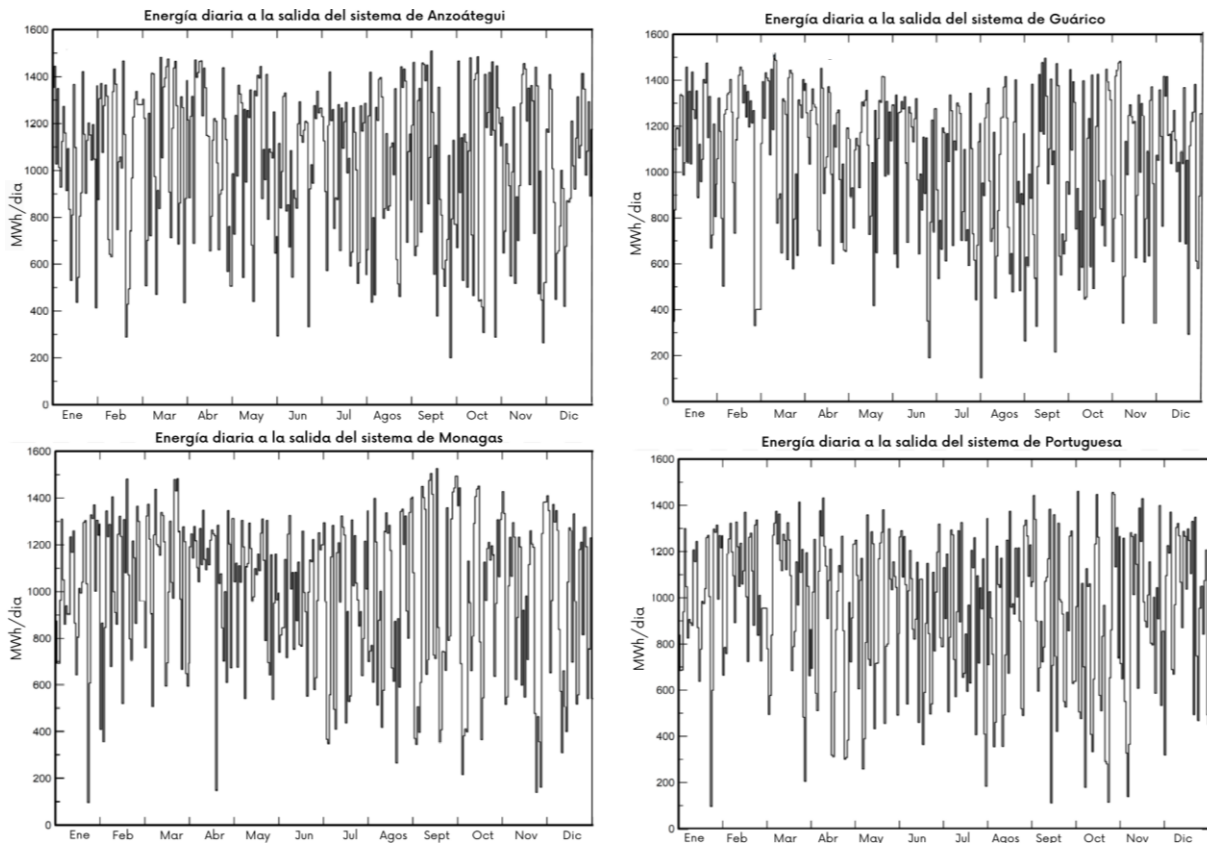
Resultados y discusión

De acuerdo con la ecuación 1, la producción de energía mediante las P-MFCs resultó en un total de 19.888.704 MWh/año para el 4% del área total de los cultivos, representando el 6,64% de la capacidad de generación eléctrica instalada en Venezuela (Asociación Venezolana de Ingeniería Eléctrica y Mecánica [AVIEM], 2020), y siendo suficiente para abastecer el consumo propio de una instalación agricultora promedio (Cusva, 2022, p.34). Sin embargo, debido a la variabilidad de P-MFCs ante factores externos y a la calidad de los suelos en torno a la presencia de minerales y material orgánico, la producción energética podría verse disminuida en 6.629.568 MWh/año a 88 mW/m², o alcanzar una producción de hasta 33.147.840 MWh/año a razón de 440 mW/m². En función de ello, aunque las P-MFCs poseen una disponibilidad durante las 24 horas del día a largo de todo el año, la energía disponible podría ser impredecible y solo pudiera ser empleada a nivel local debido a los bajos voltajes asociados las P-MFCs de forma individual (Wang et al., 2013, p.11128). Por tanto, sería imperativo una buena distribución de las celdas individuales en serie y/o en paralelo de acuerdo con las necesidades locales, lo cual puede brindarles un valor adicional a las áreas verdes cuyo valor económico es implícito (Rodríguez et al., 2021, p.35).

Por otro lado, debido a limitaciones del propio software fotovoltaico, la simulación se llevó a cabo con 1.075.000 km², es decir, el 0,1% del área estipulada para la producción de energía fotovoltaica, para la cual se requerirían un total de 416.136 módulos distribuidos en 61.650 cadenas de 27 módulos en serie y 72 inversores para cada una de las instalaciones, siendo una distribución donde las pérdidas por sobrecarga no sobrepasaron el 1,5%, y resultando en conjunto en un total de 1.664.544 módulos y 288 inversores. De hecho, las instalaciones presentaron un rendimiento medio del 83% y reportaron en promedio un 0,72% en pérdidas debido al nivel de irradiación, 9,94% en pérdidas por temperatura y un 1,07% en pérdidas por cableado óhmico. En la figura 2 se detalla el comportamiento anual de la energía inyectada en la red para las cuatro ubicaciones de las instalaciones.

Figura 2.

Energía diaria en MWh producida por las instalaciones agrofotovoltaicas ubicadas en los estados Anzoátegui, Guárico, Monagas y Portuguesa



Después de pérdidas, la producción anual de energía solar resultó en 376.322 MWh/año para el estado Anzoátegui y 382.308 MWh/año para el estado Guárico, mientras que los estados Monagas y Portuguesa presentaron una producción de 362.418 MWh/año y 346.008 MWh/año respectivamente. En conjunto, la producción agrofotovoltaica representó el 54,26% de la producción total, mientras el 45,74% restante provendría de las P-MFCs. No obstante, de cubrir los 4.300 Km² correspondientes al 50% del área abarcado por las P-MFCs, la producción eléctrica llegaría a ser de 3.703.417 GWh/año, y en conjunto con las P-MFCs, resultaría en 3.723.306 GWh/año.

Aunque el conjunto del sistema sería suficiente para cubrir hasta más de diez veces la capacidad de generación eléctrica instalada a nivel nacional (AVIEM, 2020), alcanzar esta meta de abastecimiento implicaría desafíos técnicos, económicos y políticos, cuyo abordaje sería esencial para la sustentabilidad del sistema a largo plazo. En primer lugar, sería necesario la creación de un mercado energético destinado a regular la inyección de la energía en la red, además de la creación de leyes que abarquen la acción climática de forma integrada a la vez que normalicen la compraventa de la energía, y diseñar políticas para el manejo de los desechos fotovoltaicos en conjunto con la restauración del sistema luego de los 30 años de utilidad de los paneles solares. Adicionalmente, sería necesario vencer el escepticismo ante la posibilidad

de implementar P-MFCs como un sistema donde la agricultura posea un rol protagónico sin que conlleve una disminución en la producción de alimentos, y finalmente, proveer e incentivar mecanismos de financiamiento e inversión para los grupos productores (Piñeiro et al., 2022).

Conclusiones

Venezuela posee la capacidad de abastecerse por completo mediante el aprovechamiento del potencial solar y disponibilidad de tierra con tan solo el 4% de las áreas de cultivo, llegando a generar hasta 3.723.306 GWh/año. Por tanto, el modelo sinérgico planteado puede cubrir la demanda energética de toda la región venezolana, e inclusive, debido a la escalabilidad de las P-MFCs existe la posibilidad de magnificar el esquema propuesto para cubrir mayores áreas, aumentando así la producción energética y estimulando a su vez la producción agropecuaria del país y, por tanto, favoreciendo el crecimiento económico de la región venezolana. De esta forma, el modelo sinérgico representa una oportunidad para convertir a Venezuela en una potencia en términos de producción y distribución de energía limpia a nivel mundial, trayendo consigo el crecimiento del sector agropecuario, que, en conjunto con las políticas necesarias, conllevaría un gran avance para la descarbonización y la lucha contra el cambio climático.

Referencias

- Adeh, E., Selker, J. y Higgins, C. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11). 1-15.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Asociación Venezolana de Ingeniería Eléctrica y Mecánica [AVIEM]. (2020). Informe de comisión de generación eléctrica. <https://aviem.org/informe-de-comision-de-generacion-electrica/>
- Cusva, A. (2022). Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/55211>
- Díaz, A., Marrero, G., y Puch, L. (2020). Cambio climático, crecimiento económico y el papel de las tecnologías energéticas. *Papeles de economía española*, 164(2). 120-133. <https://www.funcas.es/articulos/cambio-climatico-crecimiento-economico-y-el-papel-de-las-tecnologias-energeticas/>

- Ellaban, O., Abu-Rub, H., y Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39(1). 748-764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Fundación de Empresas Polar (2007). GeoVenezuela. Empresas Polar. <https://bibliofep.fundacionempresaspolargp.org/publicaciones/colecciones/geovenezuela/>
- Gurram, S., y Kothapalli, N. (2017). A novel electricity generation with green technology by Plant-e from living plants and bacteria: A natural solar power from living power plant. *6th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, 146-151. [10.1109/CERA.2017.8343317](https://doi.org/10.1109/CERA.2017.8343317)
- Helder, M. (2012). Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell: Electricity generation with living plants – from lab to application. <https://edepot.wur.nl/239054>
- Helder, M., Strik, D., Hamelers, B., y Busiman, C. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10). 3541–3547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.124>
- Helder, M., Strik, D., Timmers, R., Raes, S., Hamelers, H., y Buisman, C. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51(1). 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011>
- Hernández, N. [FEDECAMARAS El Orgullo De Ser Empresario]. (2022). Ventajas y desventajas de la transición energética [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=zLoQ9UV_2K4
- International Energy Agency [IEA]. (2018). The Role of Energy Efficiency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-energy-efficiency>
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2022). World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. <https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
- Olivier, J. (2022). Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions - 2021 summary report. Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://policycommons.net/artifacts/3151857/trends-in-global-co-and-total-greenhouse-gas-emissions/3949682/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (s.f.). Venezuela en una mirada. <https://www.fao.org/venezuela/venezuela/venezuela-en-una-mirada/es/>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020). Venezuela (República Bolivariana de). <https://www.fao.org/countryprofiles/index/es/?iso3=VEN>
- Piñeiro, V., Soto, D., y Campos, A. (2022). La agricultura de las Américas en el camino a la COP27: desafíos y oportunidades de la política pública. Blog de IICA. <https://blog.iica.int/blog/agricultura-las-americas-en-camino-cop27-desafios-oportunidades-politica-publica>
- Renewables.Digital. (2023). List of the 100 largest solar panel manufacturers 2023. <https://renewables.digital/product/solar-panel-manufacturers/>
- Rodríguez, R., Crespo, G., y Alvarez, M. (2021). Estudio y aplicabilidad de la electricidad producida a partir de la fotosíntesis de las plantas. <https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/ATTP155R685.pdf>
- Rojas, S., Aburto, A., Espilco, N., Minchola, J., Rodríguez, M., Fernando, O., y Mendoza, K. (2018). Electricidad a partir de plantas vivas. *Cientifi-K*, 6(1), 36–40. <https://doi.org/10.18050/Cientifi-k.v6n1a4.2018>
- Sepulveda, N., Jenkins, J., Sisternes, F., y Lester, E. (2018). The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation. *Joule*, 2(11), 2403–2420. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006>
- Strik, D., Hamelers, B., Snel, J., y Buisman, C. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International journal of energy research*, 32(9), 870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
- Wang, C., Liao, F., y Liu, K. (2013). Electrical analysis of compost solid phase microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 11124–11130. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.120>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., y Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(35), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Wood Mackenzie. (2022). Global top 10 solar PV inverter vendors account for 82% of market share. <https://www.woodmac.com/press-releases/global-top-10-solar-pv-inverter-vendors-account-for-82-of-market-share/>
- World Wildlife Fund [WWF]. (2022). Informe planeta vivo 2022: hacia una sociedad con la naturaleza en positivo. https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/informe_planeta_vivo_ipv/