

INNOVANDO EL SÁNDWICH DE PEROVSKITA BARATO Y MÁS ESTABLE

INNOVATING THE CHEAP AND MORE STABLE PEROVSKITE SANDWICHEFFORT

- (1) Evelyn B. Díaz-Cruz*
(2) E. Regalado-Pérez
(3) Diego Elizondo Delgado
(4) Julio Villanueva Caba

Instituto de Física "Ing. Luis Rivera Terrazas", Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla, San Pedro Zacachimalpa 72960
Puebla, México

Correos:

dcebetsabe@gmail.com* 4421813980
eulises@ifuap.buap.mx
diego.elizondo@alumno.buap.mx
juliovc@ifuap.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3219-129X>
<https://orcid.org/0000-0002-8665-9468>
<https://orcid.org/0009-0008-5652-3122>
<https://orcid.org/0000-0002-6261-9197>

FOLIO: A11N97.25/1013

Las celdas solares de perovskita se han consolidado como una de las tecnologías más prometedoras en el ámbito de la energía fotovoltaica, gracias a su alta eficiencia, bajo costo de producción y amplia versatilidad para diversas aplicaciones. Desde su primera demostración en 2009, estas celdas han experimentado un rápido avance, alcanzando eficiencias superiores al 26% en condiciones de laboratorio, comparables e incluso competitivas con las celdas de silicio cristalino, que dominan actualmente el mercado. A pesar de esto, las celdas de perovskita enfrentan retos importantes que dificultan su comercialización, siendo los más relevantes su inestabilidad frente a la humedad, el oxígeno y temperaturas superiores a 80°C. Además, la escalabilidad de fabricación aún requiere mejoras sustanciales que permitan reproducibilidad, bajo costo y compatibilidad con la producción a gran escala. Ante este panorama, resulta fundamental desarrollar soluciones tecnológicas que permitan la fabricación de dispositivos eficientes utilizando infraestructura mínima. Aquí nosotros informamos sobre la fabricación de celdas solares de perovskita completamente realizadas en un laboratorio de la BUAP, utilizando contactos eléctricos de bajo costo y con alto potencial de escalabilidad. Estos avances contribuyen al fortalecimiento de la autonomía científica y tecnológica de la institución, promoviendo su independencia en el desarrollo de energía limpia.

Palabras claves: celdas solares de perovskita, carbón, bajo costo, estabilidad

Abstract

Perovskite solar cells are one of the most promising new solar cell technologies, thanks to their high efficiency, low production costs, and flexibility for various applications. Since their initial demonstration in 2009, they have undergone rapid improvements, achieving lab efficiencies above 26%, which is close to that of traditional silicon-based solar panels. However, despite their impressive performance, perovskite cells still face significant challenges before they can be widely used, particularly their sensitivity to moisture, oxygen, and high temperatures, which impact their long-term stability. Making these cells scalable for industrial production also requires simple and low-cost manufacturing methods. In this context, being able to build efficient solar cells with basic equipment is a key step toward making this technology more accessible. In this article, we present for the first time the complete fabrication of perovskite solar cells at BUAP using low-cost carbon contacts. These contacts offer great potential for scaling up production. Our results show how universities can develop their own technologies and strengthen scientific independence through local innovation.

Keywords: perovskite solar cells, carbon, low cost, stability

A nivel global, las celdas solares de perovskita (Díaz-Cruz et al., 2025) han demostrado un crecimiento notable en eficiencia, alcanzando valores superiores al 26% en condiciones de laboratorio (Zhao et al., 2025), lo que las posiciona como una alternativa altamente competitiva frente a las tecnologías convencionales basadas en silicio. Sin embargo, a pesar de sus ventajas en costo y facilidad de procesamiento, la estabilidad a largo plazo y la escalabilidad de la producción siguen siendo los principales desafíos para su comercialización (R. Wang et al., 2019). Factores como la degradación inducida por la humedad, el oxígeno y la temperatura, así como la compatibilidad de los materiales con procesos industriales a gran escala, han impulsado esfuerzos globales para mejorar la durabilidad y viabilidad comercial de estos dispositivos.

En México, diversas instituciones académicas y empresas han reconocido el potencial transformador de esta tecnología y han establecido líneas de investigación enfocadas en superar estas limitaciones. Entre las colaboraciones más destacadas en el ámbito industrial, el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM), en conjunto con la empresa Solarever (Nuevos hallazgos en la investigación de la perovskita para la generación de energía fotovoltaica, 2024), trabajan en el escalamiento de dispositivos de perovskita mediante métodos de deposición de área grande, optimizando la uniformidad de las películas y reduciendo el uso de solventes críticos en el proceso de fabricación. Paralelamente, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), ha consolidado una línea de investigación enfocada en la fabricación de celdas solares de perovskita completamente desarrolladas dentro de la institución. Además, los esfuerzos para mejorar la estabilidad de estos dispositivos pueden abrir nuevas oportunidades de colaboración con otras instituciones nacionales e incluso con empresas privadas interesadas en la industrialización de esta tecnología.

La fabricación de una celda solar de perovskita con altos estándares de ren-

dimiento implica múltiples desafíos (Li et al., 2020). Uno de los principales aspectos es la necesidad de ambientes controlados, como cajas de guantes con atmósfera inerte, normalmente de nitrógeno (N₂), debido a que los materiales que se utilizan en su fabricación son sensibles al medio ambiente (humedad y oxígeno). Asimismo, aunque muchas de las capas que conforman la celda pueden fabricarse por métodos de solución química, tal como el método de rotación (spin coating), la etapa final de fabricación, el depósito de los contactos eléctricos, representa un reto considerable. Comúnmente, este proceso se realiza mediante evaporación térmica en alto vacío, una técnica que requiere temperaturas elevadas y equipos especializados con costos que superan el millón de pesos (Behrouznejad et al., 2016). Además, los contactos eléctricos convencionales suelen estar compuestos por oro (Au), que ofrece un excelente acople con el material sobre el cual se deposita, lo cual se conoce también como alineación de los niveles energéticos y estabilidad química. Sin embargo, el alto costo del Au limita la viabilidad comercial de estos dispositivos. Se han explorado alternativas como la plata (Ag) y el aluminio (Al), sin embargo, estos metales presentan desafíos adicionales: la plata penetra a través de todas las capas de la celda solar, mucho más que el Au, acelerando la degradación del dispositivo, mientras que el aluminio introduce barreras de contacto que afectan la extracción eficiente de carga (De Freitas et al., 2023).



Figura 1. Celda Solar de Perovskita con contactos de Carbón obtenida en el Laboratorio de Celdas Emergentes (elaboración propia, fotografía tomada desde VAL-2, Ecocampus Valsequillo, BUAP)

Dado el alto costo y los desafíos técnicos asociados con la deposición metálica por evaporación, una de las principales metas para abaratar los costos de producción de esta tecnología ha sido desarrollar un método alternativo para la fabricación de contactos sin recurrir a equipos de alto vacío. En el año 2024, en el laboratorio de Celdas Emergentes del IFAUP, se logró la implementación de una tinta de carbón como material conductor, eliminando la necesidad de metales costosos y técnicas de deposición sofisticadas. No obstante, este enfoque trajo consigo nuevos retos, principalmente relacionados con la compatibilidad de la tinta con las demás capas de la celda. Se observó que la capa transportadora de huecos (HTL) convencional no resistía las condiciones de procesamiento de la tinta de carbón, por lo que fue necesario sustituirla por un material más estable térmicamente, con niveles energéticos que permitieran un acople adecuado entre ellos. Estos avances han permitido desarrollar un enfoque novedoso para la fabricación de celdas solares de perovskita en México, con un potencial significativo para aplicaciones de bajo costo y mayor estabilidad a largo plazo.

¿Cómo funciona una celda solar de perovskita?

Una celda solar de perovskita convierte la luz solar en electricidad mediante una capa activa formada por un material absorbedor de luz, que es una perovskita híbrida, formada de materiales orgánicos e inorgánicos. En nuestro caso, empleamos FAMAPbI₃, una perovskita en la que FA corresponde a formamidinium, un catión orgánico con la fórmula química CH(NH₂)₂. En esta estructura, MA es el catión metilamonio, Pb es el metal central, y el yodo (I₃) actúa como el anión que se une al plomo para formar la estructura de perovskita (Regalado-Pérez et al., 2025).

Las celdas solares de perovskita se construyen en una configuración por capas, muy parecida a un sándwich. La gran diferencia es que este "sándwich solar" es **ultradelgado**. Todas sus capas juntas tienen un espesor de apenas **1100 nanómetros (nm)**, es decir, una milésima parte del grosor de un cabello humano y unas

mil veces más delgadas que la pantalla táctil de un celular. En esta estructura, la perovskita cumple el papel del jamón: el ingrediente principal que convierte la luz en electricidad. Esta capa queda "ensandwichada" entre dos contactos encargados de extraer las cargas, como si fueran los panes. Al frente (por donde incide la luz solar), se coloca un vidrio conductor transparente llamado **FTO** (por sus siglas en inglés, óxido de estaño dopado con flúor), que actúa como el pan de base sobre el cual se apilan los demás ingredientes. En la parte posterior se ubica un contacto metálico, normalmente de **oro, que sería el pan que completa el sándwich**. Además de estos contactos, la celda incluye otras capas esenciales, que la hacen mejorar, como los otros ingredientes en el sándwich. Antes de la perovskita se coloca la **capa transportadora de electrones (ETL)**, que podemos comparar con el jitomate del sándwich. Después de la perovskita, se encuentra la **capa transportadora de huecos (HTL)**, que cumple el papel de la lechuga. Esta analogía nos ayuda a visualizar de manera sencilla cómo se organiza la celda solar de perovskita, tal como se observa en la **Figura 2**.

Estos dispositivos pueden construirse con dos tipos de estructura, dependiendo del lado por **donde incide la radiación (luz) en la celda solar**, es decir, puede entrar a través de la **capa ETL** (el "jitomate") o de la **capa HTL** (la "lechuga"). Para que esto sea posible, el material por donde entra la luz debe ser **transparente a la radiación solar**. La configuración más común es aquella donde la luz entra por la **ETL**, conocida como estructura **n-i-p**. En esta, la ETL corresponde a un material semiconductor tipo-n; uno de los más empleados es el dióxido de titanio (TiO₂). Sobre ella se deposita la capa activa de **perovskita**, que funciona como material semiconductor tipo-i (intrínseco). Para más detalles sobre su fabricación, se puede consultar la metodología descrita en (Díaz-Cruz et al., 2025). Encima de la perovskita se coloca la **HTL**, que actúa como material semiconductor tipo-p. El más utilizado es **Spiro-OMeTAD**, aunque existen alternativas más económicas y estables como el **CuSCN**. Finalmente, se agregan los **contactos eléctricos** que completan la celda solar. En nuestra investigación, hemos empleado **electrodos de carbón** como una

opción alternativa a los convencionales de Au, lo que representa un enfoque más accesible y sostenible.

Sustitución del Oro por Contactos de Carbón

El principio de funcionamiento de las celdas solares de perovskita se basa en cuatro pasos principales, a partir del efecto fotovoltaico (Copeland et al., 1942), esquematizados en la **Figura 2b**: 1) La absorción de luz, en donde la capa de perovskita absorbe la luz solar en el rango visible e infrarrojo cercano, generando cargas libres, es decir, pares electrón-hueco (negativas-positivas). 2) Generación y separación de cargas: En la capa de perovskita, los electrones y huecos generados son atraídos (separados) por las capas ETL y HTL, respectivamente, para evitar que estos se atraigan mutuamente (recombinación). 3) Transporte de cargas: En este paso, los electrones se trasladan (transportan) hacia la ETL o TiO_2 (jitomate), mientras que los huecos lo hacen hacia la HTL o CuSCN (lechuga). Y 4) Extracción y generación de corriente: Finalmente, las cargas llegan a los electrodos (panes), en este caso FTO y carbón, en donde hacen fluir electrones a través del circuito externo, generando la electricidad.

Los contactos eléctricos de pasta de carbón son una alternativa a los contactos de oro, plata o aluminio que se utilizan normalmente para celdas solares de perovskita (Bogachuk et al., 2020). Su depósito se hace con dos sencillas técnicas de procesamiento; una de ellas es doctor blade o blade coating (impresión por arrastre de cuchillas), y la otra técnica es serigrafía o screen printing, la cual es una técnica muy similar a la utilizada en el estampado de ropa/playeras. Estas técnicas ofrecen varias ventajas sobre las tradicionales, como la evaporación. La principal ventaja es su fácil procesamiento sin reactivos ni equipos costosos, lo que reduce significativamente los costos de fabricación.

En la Figura 3 se muestra una ilustración de cómo se realiza el depósito por medio de esta técnica en 4 pasos. I) Delimitar el tamaño de los contactos con cinta, II) se coloca la pasta, III) Arrastrar con una rasqueta o vidrio a 45° con fuerza moderada, trazo uniforme y velocidad constante para obtener un recubrimiento homogéneo y IV) se seca el solvente a 65°C por 30 minutos.

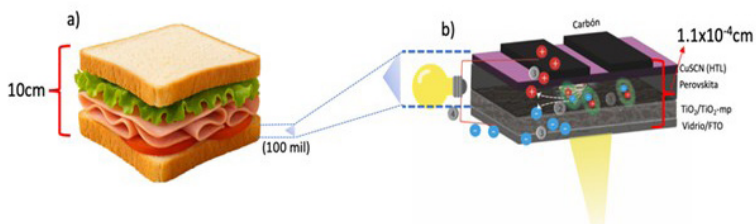


Figura 2. a) Estructura de un sándwich de jamón y b) Esquema del funcionamiento de una celda solar de perovskita con estructura normal n-i-p. (elaboración propia)

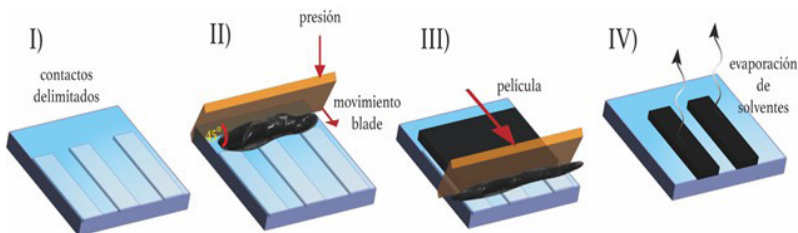


Figura 3. Ilustración de la técnica de doctor blade (elaboración propia)

Así como con un sándwich sabemos qué tan bueno es hasta que lo probamos, primero lo olemos y luego le damos una buena mordida, las celdas solares de perovskita también necesitan ser “probadas” para demostrar qué tan bien convierten la luz del Sol en electricidad. Esa “mordida de prueba” se llama medición de la eficiencia de conversión y se obtiene a partir de las curvas de densidad de corriente contra voltaje (J-V) bajo condiciones de iluminación estándar equivalentes a un Sol (AM1.5G, 100 mW/cm²). Una curva J-V representativa para la celda solar de perovskita con contactos de carbón se muestra en la Figura 4. La eficiencia de conversión de energía se calcula usando la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{J_{sc} * V_{oc} * FF}{P} * 100$$

Donde J_{sc} es la densidad de corriente de cortocircuito (mA/cm²) (círculo verde en la Figura 4), V_{oc} es el voltaje en circuito abierto (V) (círculo rojo en la Figura 4), FF es el factor de forma (en %) (recuadro amarillo en la Figura 4), P es la potencia de entrada (normalmente 100 mW/cm² bajo iluminación AM1.5G).

Ahora bien, ningún sándwich de jamón dura para siempre. Si lo dejamos fuera del refrigerador, tarde o temprano empieza a descomponerse, y ya no es seguro comerlo. Algo parecido pasa con las perovskitas: también tienen un “tiempo de vida” limitado, a esto se le llama estabilidad, que depende de varios factores como la humedad, el oxígeno y la radiación ultravioleta (UV), entre otros.

En las celdas solares de perovskita, la estabilidad se evalúa vigilando cómo cambian sus parámetros fotovoltaicos con el tiempo (círculos verde, morado y rojo de la Figura 4), siendo la eficiencia uno de los más importantes. En otras palabras, igual que con un sándwich, lo interesante no es solo qué tan rico (o eficiente) es al principio, sino cuánto tiempo puede mantenerse en buenas condiciones antes de “echarse a perder”.

En la Figura 5 se muestra la comparación de dos tipos de celdas solares de perovskita que fueron monitoreadas durante cinco meses para medir su durabilidad, variando tanto la capa HTL (la “lechuga”) como el tipo de contacto eléctrico (el “pan”), ya sea de carbón o de oro.

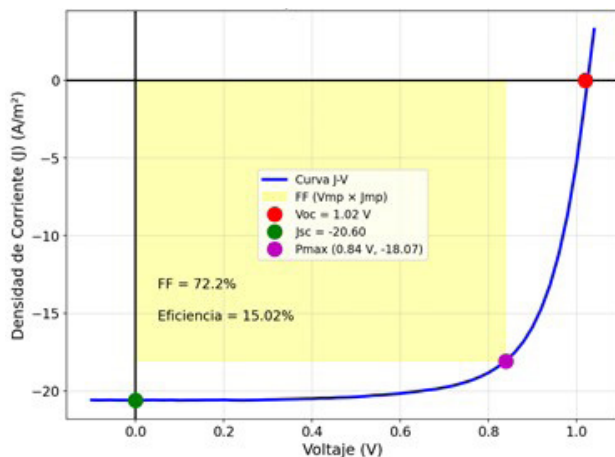


Figura 4. Curva Densidad de corriente contra Voltaje (J-V) para una celda solar de perovskita con contactos de carbón, medida bajo una intensidad de iluminación igual a 1 Sol. Los círculos: verde, morado y rojo señalan la densidad de corriente, potencia máxima y voltaje de circuito abierto

Es como comparar dos sándwiches de jamón: en el primero usamos un pan artesanal, que en este caso sería el oro, más costoso y sin conservadores, que además obliga a usar una lechuga especial tipo sangría, equivalente al Spiro-OMeTAD, también cara y delicada; mientras que en el segundo optamos por un pan tradicional, que sería el carbón, más económico y con conservadores, que combina perfectamente con una lechuga romana, equivalente al CuSCN, más barata y resistente. En la gráfica, la línea negra representa la celda solar con contactos de carbón, es decir, el “sándwich económico”, mientras que la línea amarilla corresponde a la celda con contactos de oro, el “sándwich gourmet”, y el resultado es evidente: el sándwich caro se echa a perder mucho más rápido.

La celda con oro y Spiro-OMeTAD perdió la mitad de su eficiencia en solo cinco meses, debido a que el oro tiende a difundirse hacia otras capas (S. Wang et al., 2016), formando pequeños canales por los que entran humedad y oxígeno, los principales responsables de degradar la perovskita (Yang et al., 2015). En contraste, la celda con contactos de carbón y CuSCN como HTL conservó el 93 % de su eficiencia inicial en el mismo periodo, mostrando una notable mejora en estabilidad. Esto demuestra que los contactos de carbón no solo reducen costos, sino que también ofrecen mayor durabilidad, lo que los con-

vierte en una alternativa prometedora para aplicaciones de largo plazo, es decir, para su uso comercial.

En resumen, mientras que el Spiro-OMeTAD sigue siendo el material más popular para fabricar la HTL, su alto costo y su sensibilidad limitan el desempeño a largo plazo. En cambio, el CuSCN se perfila como una opción más económica y estable, acercando a las perovskitas un paso más hacia su comercialización.

Evaluación de costos y viabilidad comercial de celdas solares de perovskita con CuSCN y carbón

En la **Figura 6** se presentan los costos estimados de fabricación de celdas solares de perovskita, con un desglose detallado de los materiales empleados. Para un dispositivo de laboratorio con dimensiones de $2 \times 2 \text{ cm}^2$, se estima que el costo del sustrato de vidrio recubierto con óxido conductor transparente (FTO), más la capa de TiO_2 compacto, más el TiO_2 mesoporoso, más la capa activa de perovskita (formada por FAI , PbI_2 , MABr y PbBr_2), asciende a aproximadamente \$30.72 MXN. Este valor resulta competitivo y alentador desde el punto de vista del escalamiento industrial, sobre todo considerando que corresponde a las partes más críticas de la celda en términos de generación de carga y eficiencia de conversión.

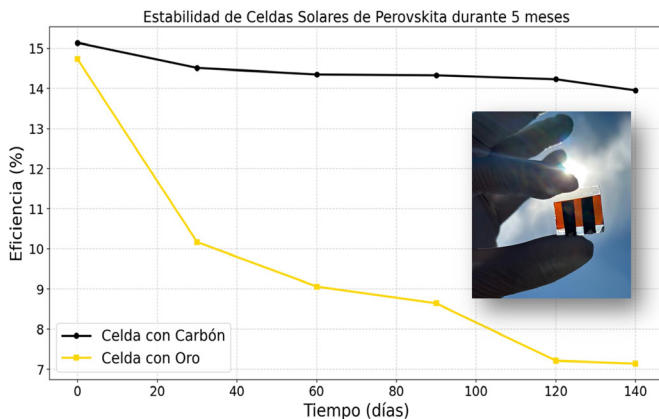


Figura 5. Monitoreo de la estabilidad para celdas solares de perovskita, con dos contactos diferentes: Carbón (puntos negros) y Oro (puntos amarillos), durante 5 meses (elaboración propia)

No obstante, el costo total del dispositivo se ve fuertemente influenciado por los materiales elegidos para la capa de transporte de huecos (HTL) y los contactos eléctricos (la "lechuga" y el "pan" que complementa el sándwich). Para ilustrar esta diferencia, se compararon dos configuraciones distintas: I) Una celda que emplea CuSCN como HTL y carbón como contacto posterior (sándwich económico) vs II) una celda que utiliza Spiro-OMeTAD y Au (sándwich gourmet), que son materiales comúnmente usados en celdas de alta eficiencia de laboratorio. El análisis de costos revela una diferencia sustancial: la celda con CuSCN y carbón tiene un costo total estimado de \$32.78 MXN. En contraste, la celda con Spiro-OMeTAD y Au alcanza un costo de \$261.72 MXN. Esto representa un incremento de \$228.94 MXN, es decir, aproximadamente 8 veces más costoso cuando se utilizan materiales como el oro y el Spiro-OMeTAD. Este aumento se debe, principalmente, al elevado precio del oro (~600 USD/g) y del Spiro-OMeTAD (~564 USD/g), además de los requerimientos técnicos asociados, como la deposición al vacío mediante evaporación térmica para los contactos metálicos.

La sustitución de estos materiales costosos por alternativas como CuSCN y carbón no solo reduce drásticamente el costo de fabricación, sino que también ofrece ventajas en términos de procesabilidad y compatibilidad con técnicas de producción en masa: El CuSCN puede ser procesado a baja temperatura (70°C) y depositado mediante técnicas como spin-coating o impresión de tinta, mientras que el carbón, en forma de tinta o pasta, puede aplicarse por métodos de bajo costo como serigrafía, rodillo o doctor blade, sin necesidad de atmósferas controladas ni equipos complejos.

A gran escala, y considerando las economías de escala en la producción de módulos de 1 m², se estima que un panel solar de perovskita con arquitectura basada en CuSCN y carbón podría fabricarse por menos de \$500–800 MXN/m² (~25–40 USD/m²), dependiendo de la infraestructura utilizada. Este costo es considerablemente menor en comparación con tecnologías basadas en silicio (~60–100 USD/m²) o en perovskitas con contactos metálicos (~100–200 USD/m²).

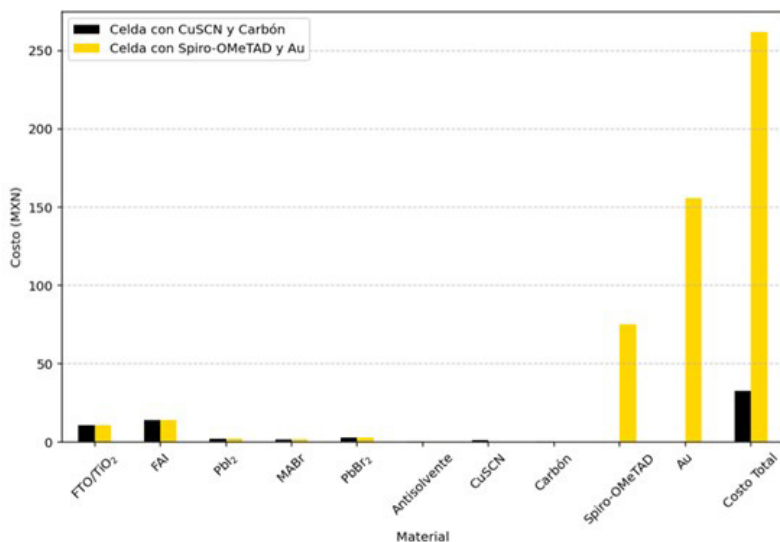


Figura 6. Comparación de costos para la producción de una celda solar de perovskita (dimensiones de 2x2 cm²) con contactos de carbón y oro (elaboración propia).

Hasta ahora, el uso de contactos de carbón en las celdas solares de perovskita ha mostrado una mejora notable en la estabilidad frente a los contactos metálicos tradicionales, como el oro. Sin embargo, estos dispositivos aún deben conservarse en ambientes con humedad controlada, ya que la exposición al agua sigue siendo uno de los principales factores de degradación. Esto representa un reto importante para su uso en condiciones reales, fuera del laboratorio. Uno de los grandes desafíos actuales es desarrollar recubrimientos o encapsulados que protejan eficazmente las celdas sin elevar demasiado los costos ni complicar su fabricación. Además, se busca reemplazar el plomo presente en muchas de estas celdas solares por

materiales menos tóxicos, como estaño, bismuto o antimonio, sin sacrificar la eficiencia ni la estabilidad del dispositivo.

Por otro lado, llevar estas tecnologías del laboratorio a la industria también implica superar barreras técnicas. Fabricar celdas de mayor tamaño y de manera uniforme requiere métodos como la impresión o la coevaporación, que aún están en proceso de optimización. A esto se suma la necesidad de simplificar la fabricación: muchos métodos actuales dependen de atmósferas controladas o equipos especializados. Por ello, uno de los retos más relevantes es adaptar los procesos para que puedan realizarse en condiciones ambientales comunes, manteniendo su rendimiento y durabilidad.

Conclusiones

La fabricación de celdas solares de perovskita con contactos de carbón ha sido como preparar un nuevo tipo de sándwich en la BUAP: aunque no siempre tuvimos todos los ingredientes más caros o el horno más moderno, supimos improvisar en la cocina y logramos un resultado funcional y sabroso.

Uno de los principales logros fue cambiar el pan gourmet de oro por un pan mucho más sencillo y económico de carbón, que no solo mantuvo el sabor del sándwich, sino que además lo hizo más accesible y fácil de replicar. Este cambio abre la posibilidad de preparar muchos más sándwiches,

mejor dicho, celdas solares, a gran escala y con menor costo, algo fundamental para pensar en un menú energético nacional.

Además, evaluamos directamente cuánto tiempo nuestro “sándwich solar” se mantiene fresco frente a la humedad, el calor y la luz intensa, generando datos clave sobre su estabilidad y confiabilidad. Este conocimiento refuerza la autonomía científica de la institución y sienta las bases para seguir perfeccionando la receta, con miras a desarrollar tecnologías limpias adaptadas al paladar y a las necesidades energéticas de nuestro país.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Este trabajo fue soportado con el apoyo del Proyecto: CONACYT CF-2019-848260. Los autores E.B.D.C y E.R.P agradecen a la beca de Investigadores por México M2.

Behrouznejad, F., Shahbazi, S., Taghavinia, N., Wu, H.-P., & Wei-Guang Diao, E. (2016). A study on utilizing different metals as the back contact of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(35), 13488-13498. <https://doi.org/10.1039/C6TA05938D>

Bogachuk, D., Zouhair, S., Wojciechowski, K., Yang, B., Babu, V., Wagner, L., Xu, B., Lim, J., Mastroianni, S., Pettersson, H., Hagfeldt, A., & Hinsch, A. (2020). Low-temperature carbon-based electrodes in perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 13(11), 3880-3916. <https://doi.org/10.1039/D0EE02175j>

Copeland, A. Wallace., Black, O. D., & Garrett, A. B. (1942). The Photovoltaic Effect. *Chemical Reviews*, 31(1), 177-226. <https://doi.org/10.1021/cr60098a004>

De Freitas, J. N., De Moraes, A., Silva Filho, J. M. C., & Marques, F. D. C. (2023, octubre 18). Stability of Metal Contacts in Perovskite Solar Cells. *Proceedings of the Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics*. 7th Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics, Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.29363/nanoge.iperop.2024.040>

Díaz-Cruz, E. B., Regalado-Pérez, E., Santos-Cruz, J., Alvarado, J., Meneses-Rodríguez, D., & Villanueva-Cab, J. (2025). Temperature-Dependent Li⁺ Diffusion and Its Influence on Doping Profile and Stability of Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Energy Materials*, 8(7), 4331-4344. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03247>

Nuevos hallazgos en la investigación de la perovskita para la generación de energía fotovoltaica. (2024, junio 4). *pvmagazine Mexico*. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2024/06/04/nuevos-hallazgos-en-la-investigacion-de-la-perovskita-para-la-generacion-de-energia-fotovoltaica/>

Regalado-Pérez, E., Díaz-Cruz, E. B., & Villanueva-Cab, J. (2025). Impact of the hole transport layer on the space charge distribution and hysteresis in perovskite solar cells analysed by capacitance-voltage profiling. *Sustainable Energy & Fuels*, 9(5), 1225-1235. <https://doi.org/10.1039/D4SE01262C>