

Anthocyanins in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs): Systematic Review (2020–2025) and Conceptual Design of a Low-Cost Semitransparent Panel

Braulio Edinson Sifuentes Cuadros¹; Brescia Fernanda Neyra Cabrera²; Llegner Wanyu Castillo Lao³; Sara Rita Naupari Montenegro⁴; Iselli Josylin Nohely

Murga Gonzalez⁵; Kelly Milena Polo Herrera⁶; Marco Antonio Diaz Diaz⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidad Privada del Norte, Perú, ¹N00314563@upn.pe; ²N00313330@upn.pe; ³N00331015@upn.pe;

⁴sara.naupari@upn.edu.pe; ⁵iselli.murga@upn.edu.pe; ⁶kelly.polo@upn.edu.pe, kellypoloh@gmail.com; ⁷marco.diaz@upn.edu.pe

Abstract

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) are a low-cost photovoltaic alternative, particularly attractive for applications where semi-transparency and architectural integration are critical. This study conducts a systematic review of the scientific literature published between 2020 and 2025 to identify advances, limitations, and trends in the use of anthocyanin-rich natural dyes as sensitizers in DSSCs and, based on the evidence, to support a conceptual design proposal for a low-cost semi-transparent solar panel. Fifty studies were screened and twenty relevant articles were selected using criteria related to materials, device architecture, photovoltaic performance, and reported applications. The reviewed evidence indicates that anthocyanins extracted from accessible fruits and flowers can act as functional sensitizers; however, performance is often constrained by pigment photochemical instability, extraction efficiency, and adsorption kinetics on the semiconductor surface, as well as charge recombination losses. The literature also highlights that using mesoporous TiO₂ photoanodes and carbon-based counter electrodes can improve the cost-performance trade-off and the sustainability profile of the system compared with critical components such as ruthenium- and platinum-based materials. Based on these findings, a conceptual design is proposed for semi-transparent DSSCs targeting solar windows, active façades, and greenhouses (agrivoltaics). Overall, natural-dye-based DSSCs emerge as a complementary option for low-power distributed generation in BIPV solutions where semi-transparency provides added value.

Keywords: “Dye-sensitized solar cells (DSSC)”, “Anthocyanins, Natural dyes”, “Semi-transparent photovoltaics”, “Building-integrated photovoltaics (BIPV)”

Antocianinas en Celdas Solares Sensibilizadas (DSSC): Revisión Sistemática (2020–2025) y Diseño Conceptual de un Panel Semitransparente de Bajo Costo

Braulio Edinson Sifuentes Cuadros¹; Brescia Fernanda Neyra Cabrera²; Llegner Wanyu Castillo Lao³; Sara Rita Naupari Montenegro⁴; Iselli Josylin Nohely

Murga Gonzalez⁵; Kelly Milena Polo Herrera⁶; Marco Antonio Diaz Diaz⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidad Privada del Norte, Perú, ¹N00314563@upn.pe; ²N00313330@upn.pe; ³N00331015@upn.pe;

⁴sara.naupari@upn.edu.pe; ⁵iselli.murga@upn.edu.pe; ⁶kelly.polo@upn.edu.pe, kellypoloh@gmail.com; ⁷marco.diaz@upn.edu.pe

Resumen— Las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) constituyen una alternativa fotovoltaica de bajo costo, especialmente atractiva en aplicaciones donde la semitransparencia y la integración arquitectónica son determinantes. Este estudio presenta una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025 para identificar avances, limitaciones y tendencias en el uso de colorantes naturales ricos en antocianinas como sensibilizadores en DSSC y, con base en la evidencia, sustentar una propuesta de diseño conceptual de un panel solar semitransparente económico. Se evaluaron 50 estudios y se seleccionaron 20 artículos relevantes mediante criterios asociados a materiales, arquitectura del dispositivo, desempeño fotovoltaico y aplicaciones reportadas. Los resultados indican que las antocianinas extraídas de frutas y flores accesibles pueden actuar como sensibilizadores funcionales; sin embargo, su rendimiento suele estar condicionado por la estabilidad fotoquímica del pigmento, la eficiencia del proceso de extracción y la cinética de adsorción sobre el semiconductor, además de pérdidas por recombinación electrónica. La literatura también destaca que el empleo de fotoánodos de TiO₂ mesoporoso y contraelectrodos basados en carbono mejora el compromiso costo–desempeño y el perfil de sostenibilidad del sistema frente a componentes críticos como rutenio y platino. A partir de estos hallazgos, se plantea un diseño conceptual orientado a ventanas solares, fachadas activas e invernaderos (agrovoltaica). En conjunto, las DSSC basadas en colorantes naturales se perfilan como una alternativa complementaria para generación distribuida de baja potencia en soluciones BIPV donde la funcionalidad semitransparente aporta valor.

Palabras claves: “Celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC)”; “Antocianinas”; “Colorantes naturales”; “Fotovoltaica semitransparente”; “Fotovoltaica integrada en edificios (BIPV)”

I. Introducción

La creciente demanda energética mundial y la urgente necesidad de mitigar el cambio climático han impulsado la investigación hacia fuentes de energía renovable, las cuales ya representan aproximadamente el 30% de la generación eléctrica global. Si bien las celdas solares de silicio dominan el mercado actual con una participación de más del 90% del sector fotovoltaico en comparación con otras tecnologías de película delgada o emergentes, su alto costo de fabricación, procesos complejos y opacidad limitan su integración en aplicaciones arquitectónicas o de interiores [1]. En este contexto, las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSC, por sus siglas en inglés), también conocidas como celdas Grätzel, han emergido como una

alternativa prometedora debido a su bajo costo, flexibilidad y buen desempeño en condiciones de luz difusa [2], [12].

Sin embargo, la configuración convencional de las DSSC presenta desafíos significativos para su masificación sostenible. Generalmente, estas celdas dependen de sensibilizadores basados en Rutenio y contra-electrodos de Platino. El Rutenio es un metal escaso, de alto costo y con preocupaciones ambientales asociadas a su extracción y disponibilidad, lo que contradice el principio de sostenibilidad ambiental [8], [17]. Por otro lado, el Platino representa una barrera económica considerable, constituyendo una gran parte del costo total del dispositivo [20]. Como respuesta, la comunidad científica ha volcado su interés hacia los sensibilizadores naturales, específicamente pigmentos extraídos de plantas, frutas y flores, como las antocianinas, betalainas y clorofilas, los cuales son abundantes, biodegradables y de extracción económica [9], [15].

A pesar de las ventajas ecológicas, las DSSC basadas en tintes naturales suelen presentar eficiencias de conversión inferiores a sus contrapartes sintéticas. No obstante, estudios recientes sugieren que la optimización de la arquitectura de la celda, el uso de contra-electrodos de carbono y el dopaje de los fotoánodos pueden mejorar el desempeño significativamente, alcanzando valores de eficiencia de hasta 1.74% con colorantes como la Alstroemeria e incluso hasta 4.25% en configuraciones optimizadas con materiales carbonosos. [16], [19]. Además, la capacidad de estos dispositivos para ser semitransparentes no es solo una característica estética, sino una ventaja funcional crítica que abre un nicho de mercado único en la integración arquitectónica y la agricultura (agrovoltaica) [1], [2]. En el ámbito arquitectónico, esta propiedad permite que los paneles actúen como filtros solares activos en ventanas y fachadas, reduciendo la carga térmica al absorber selectivamente parte de la radiación, lo que disminuye el consumo de energía en climatización sin sacrificar la iluminación natural. Por otro lado, en la agrovoltaica, la semitransparencia es fundamental para permitir el paso de la luz fotosintéticamente activa necesaria para los cultivos, permitiendo la coexistencia de la producción de alimentos y la generación de energía limpia en el mismo espacio. Esta dualidad operativa convierte a las DSSC en una tecnología clave para el desarrollo de infraestructuras inteligentes y sostenibles.

Existe una necesidad clara de sistematizar la evidencia dispersa sobre qué tintes y configuraciones ofrecen el mejor balance costo-eficiencia para fundamentar diseños aplicables. Por consiguiente, el objetivo general de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025, siguiendo los criterios de elegibilidad y flujo del método PRISMA, con el fin de identificar los avances y limitaciones en

el uso de antocianinas extraídas de frutas de bajo costo. A diferencia de estudios previos centrados únicamente en la caracterización química, el aporte principal de este trabajo radica en integrar dicha evidencia para fundamentar el diseño conceptual de un panel solar semitransparente, cubriendo así la necesidad de propuestas tecnológicas que vinculen la eficiencia de nuevos materiales con aplicaciones arquitectónicas accesibles y sostenibles.

Los objetivos específicos de este trabajo consisten en analizar, mediante una matriz de sistematización, los materiales, configuraciones y parámetros técnicos reportados entre 2020 y 2025 que influyen en la eficiencia de las celdas solares sensibilizadas por antocianinas, para luego evaluar las ventajas y limitaciones de las arquitecturas semitransparentes aplicables a la integración arquitectónica. A partir de esta evaluación, se busca integrar los hallazgos para formular un diseño conceptual de un panel solar semitransparente orientado a aplicaciones en ventanas inteligentes e invernaderos, que maximice la factibilidad técnica y económica en entornos de recursos limitados.

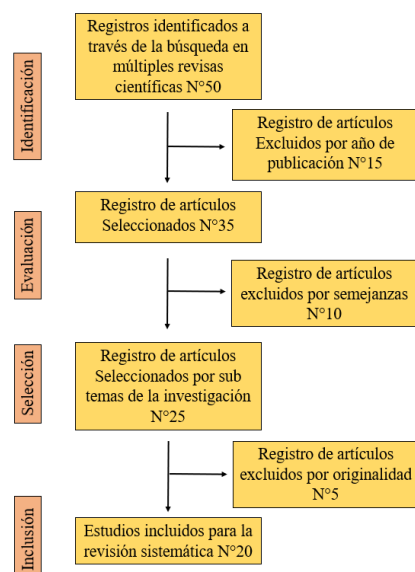
Este estudio busca responder a la siguiente pregunta: ¿Qué configuraciones, materiales y parámetros reportados (2020–2025) maximizan el compromiso desempeño–costo en DSSC sensibilizadas con antocianinas (mora y frambuesa) para orientar un diseño conceptual de un panel semitransparente?

II. Metodología

Este estudio realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo la guía PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), orientada específicamente a la formulación de una propuesta de diseño conceptual para un panel solar semi transparente de bajo costo basado en celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales (DSSC). Metodológicamente, el trabajo corresponde a una investigación de carácter cualitativo-analítico, fundamentada en la recopilación, selección y análisis crítico de artículos científicos, priorizando aquellos publicados entre los años 2020 y 2025. Para el desarrollo de esta investigación, se aplicó un protocolo reproducible de búsqueda y selección de literatura científica, orientado al análisis comparativo de materiales, configuraciones y enfoques de diseño. Este procedimiento permite integrar la información técnica recopilada en un modelo de fabricación viable, fundamentando los parámetros necesarios para la propuesta de un panel solar semitransparente

Para garantizar la rigurosidad y la reproducibilidad de la investigación, se diseñó una estrategia de búsqueda bibliográfica en bases de datos indexadas de alto impacto, incluyendo Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect, complementadas con el motor de búsqueda Google Scholar para ampliar el espectro de la literatura gris relevante. La exploración se acotó temporalmente al periodo 2020–2025 para asegurar la vigencia tecnológica de los hallazgos, empleando operadores booleanos (AND, OR) y combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como “Dye-Sensitized Solar Cell”, “Natural Dye”, “Anthocyanin”, “Celdas solares sensibilizadas”, “Colorantes naturales” y “Antocianinas”. Asimismo, se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) para refinar los resultados, intersectando los dominios de la energía fotovoltaica, la biotecnología y la ingeniería de materiales para localizar estudios que abordan simultáneamente la eficiencia energética y la sostenibilidad económica.

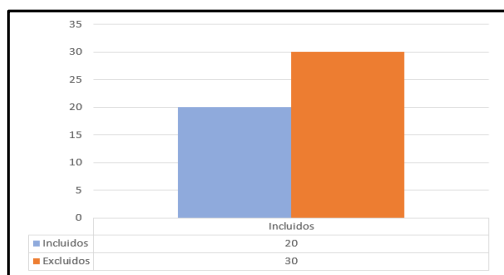
Se aplicaron criterios de elegibilidad predefinidos para la selección de la literatura, con el propósito de filtrar la evidencia de mayor rigor técnico y asegurar la relevancia de los hallazgos. Estos criterios permitieron depurar la información recolectada, priorizando estudios experimentales y revisiones sistemáticas que aportaran datos cuantitativos sobre la eficiencia de conversión y la estabilidad de las celdas sensibilizadas por antocianinas. Se definieron como criterios de inclusión la selección de publicaciones en revistas científicas arbitradas, estudios experimentales centrados en DSSC con colorantes naturales, e investigaciones que reportarán datos cuantitativos sobre materiales, configuraciones arquitectónicas y desempeño fotovoltaico (eficiencia, voltaje y factor de llenado). De manera complementaria, se establecieron criterios de exclusión para descartar estudios fuera del rango temporal, trabajos no revisados por pares, investigaciones centradas en tecnologías fotovoltaicas convencionales basadas en silicio cristalino, o documentos con información insuficiente para el análisis comparativo propuesto.



Selección de artículos

Fig. 1 Diagrama PRISMA: resumen del proceso de selección de artículos (identificación, evaluación y exclusión)

El proceso de selección de la literatura siguió un flujo sistemático representado en la Figura 1. Se identificaron inicialmente 50 registros a través de la búsqueda en múltiples revistas científicas. Tras una fase de evaluación, se excluyeron 15 artículos por año de publicación, resultando en 35 estudios seleccionados. Posteriormente, se descartaron 10 registros por semejanzas (duplicidad o solapamiento de información), reduciendo la muestra a 25 artículos elegidos por subtemas de la investigación. En la fase final de selección, se excluyeron 5 registros por falta de originalidad o insuficiencia de datos técnicos. Como resultado de este cribado, se consolidó una muestra final de 20 artículos para la revisión sistemática, los cuales constituyen el núcleo analítico y la base empírica para la propuesta de diseño.



Selección de artículos
Fig. 2 Cantidad de artículos incluidos y excluidos

El análisis de los artículos seleccionados se realizó mediante una matriz de sistematización, considerando categorías críticas para la ingeniería del dispositivo, tales como el tipo de colorante natural utilizado (con énfasis en antocianinas), la composición y morfología del semiconductor de dióxido de titanio, el material del contraelectrodo como sustituto del platino, la arquitectura de la celda, el nivel de semitransparencia logrado, la eficiencia de conversión reportada y las implicancias en términos de costo y sostenibilidad. Esta categorización permitió identificar patrones de éxito y fallos recurrentes en la literatura, aislando las variables que maximizan la relación costo-eficiencia. Para fines de este estudio, dicha relación fue estimada mediante el análisis comparativo entre la complejidad del método de síntesis del colorante, el costo de los precursores químicos (sustitución de metales nobles por extractos orgánicos) y la eficiencia de conversión energética (PCE) reportada en cada investigación.

Una fase distintiva de esta metodología es la integración directa de los resultados del análisis sistemático con la formulación de la propuesta de diseño conceptual. Los hallazgos sobre las configuraciones y materiales más eficientes no se presentan de forma aislada, sino que se sintetizan para definir las especificaciones técnicas de un nuevo dispositivo. Es fundamental aclarar que esta propuesta no corresponde a un prototipo experimental validado en laboratorio en esta instancia, sino a un modelo conceptual orientado a la fabricación, desarrollado a partir de la mejor evidencia científica disponible. Este enfoque permite proponer una arquitectura de panel optimizada teóricamente, reduciendo la incertidumbre previa a la fase de prototipado físico.

Finalmente, se reconocen las limitaciones metodológicas inherentes al estudio, asociadas principalmente al número finito de artículos seleccionados y a la heterogeneidad de las condiciones experimentales reportadas en las diversas fuentes, lo que introduce variables que dificultan una comparación directa perfecta. Asimismo, se declara la ausencia de validación experimental directa de la propuesta en esta etapa de la investigación. Sin embargo, se resalta que la revisión sistemática permite identificar tendencias robustas y fundamentar decisiones de diseño a nivel conceptual con un grado de certeza técnica superior al de un diseño empírico sin base bibliográfica, cumpliendo así con los estándares de rigor científico exigidos para propuestas de ingeniería.

III. Resultados

La eficiencia de conversión energética (η) constituye el parámetro más relevante para evaluar el desempeño fotovoltaico,

integrando el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) y el factor de llenado (FF). Los valores reportados en la literatura seleccionada provienen de estudios bajo condiciones de iluminación estándar (AM 1.5G), aunque con variaciones metodológicas en la preparación. Se observa que, si bien las DSSC basadas en colorantes naturales presentan eficiencias inferiores a las sintéticas, existen diferencias significativas entre las distintas fuentes vegetales evaluadas [9], [15].

Dentro de los estudios comparativos, el extracto de *Alstroemeria* destaca con el mayor rendimiento fotovoltaico reportado, alcanzando una eficiencia máxima (η) del 1.74% [9]. Da Conceição et al. reportaron este desempeño mediante una configuración que empleó un fotoánodo de TiO_2 con un espesor de 12 μm , un electrolito líquido de yoduro/triyoduro (I^-/I_3^-) y un contraelectrodo de platino (Pt) [9]. Esta combinación permitió maximizar la transferencia de carga frente a otros pigmentos analizados bajo las mismas condiciones.

En contraste, otros colorantes mostraron rendimientos inferiores. Los extractos de maíz morado o espinaca presentaron valores de eficiencia (PCE) oscilantes entre el 0.05% y el 0.15% [15]. Estos valores se comparan desfavorablemente con el rango superior al 0.50% alcanzado por las antocianinas de frutos rojos. Por ejemplo, el extracto de arándano alcanzó eficiencias cercanas al 1.02%, mientras que el de Bixa orellana (*Achiote*) registró valores alrededor del 0.85% bajo condiciones específicas de extracción [5, 10].

Asimismo, la evidencia cuantitativa indica que el rendimiento está condicionado por el solvente utilizado. Yuan et al. reportaron que el uso de solventes acidificados (mezclas de etanol con ácidos orgánicos) incrementa los parámetros fotovoltaicos respecto a solventes neutros, siendo determinante en el caso del arándano para mejorar la absorción espectral [5]. De manera similar, Ituen et al. reportaron que los datos sobre Bixa orellana indican que el uso de acetona favoreció la respuesta fotovoltaica en comparación con otros solventes, aunque con variaciones en la estabilidad temporal [10].

TABLA 1. Parámetros fotovoltaicos comparativos de celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales seleccionados (2020–2025)

Fuente del colorante	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	Eficiencia (%)	Referencia
Alstroemeria	~0.61	~4.20	~0.68	1.74	[9]
Arándano	~0.55	~3.10	~0.60	~1.02	[5]
Achiote (Bixa orellana)	~0.52	~2.80	~0.58	~0.85	[10]

Fuente: Resultados de los estudios [5], [9], [10]

Uno de los principales factores que limitan la viabilidad comercial de las DSSC convencionales es el uso de platino (Pt) como

material del contra-electrodo. La literatura revisada coincide en que el platino puede representar aproximadamente entre 40% y 50% del costo total del electrodo, debido tanto al precio del material como a los procesos de deposición requeridos [20]. Esta situación resulta incompatible con el objetivo de desarrollar dispositivos fotovoltaicos de bajo costo y amplia accesibilidad, especialmente para aplicaciones en países en desarrollo o sistemas de generación distribuida.

En respuesta a esta problemática, múltiples estudios han evaluado el uso de materiales basados en carbono como grafito, hollín, carbón activado y compuestos carbonosos como alternativas viables al platino. Las evidencias experimentales muestran que estos materiales presentan una actividad catalítica aceptable para la reacción redox del electrolito (I^-/I_3^-), además de ventajas significativas en términos de disponibilidad, costo y sostenibilidad ambiental [6], [20]. En particular, se ha demostrado que electrodos fabricados a partir de grafito de bajo costo o materiales carbonosos simples pueden alcanzar eficiencias comparables a las de electrodos de Pt en aplicaciones de baja potencia [6].

Desde un enfoque tecnoeconómico, los estudios indican que, si bien la sustitución del platino por carbono puede generar una ligera reducción en el factor de llenado (FF) y, por ende, en la eficiencia total de la celda, esta disminución es compensada ampliamente por la reducción drástica del costo de manufactura (CAPEX) que es el “Capital expenditure” que se aplica para un proyecto [14]. En consecuencia, el costo por watt generado (\$/W) resulta significativamente menor en DSSC con contra-electrodos de carbono, lo que las convierte en una opción más competitiva para aplicaciones masivas y semitransparentes [14]. Adicionalmente, se reportan eficiencias de hasta 4.25% en configuraciones optimizadas con materiales carbonosos, evidenciando que el desempeño puede mantenerse dentro de rangos funcionales aceptables [19].

TABLA 2. Comparación conceptual entre contra-electrodos de platino y carbono en DSSC

Tipo de contra-electrodo	Materi al principal	Activid ad catalíti ca para I^-/I_3^-	Impact o en la eficien cia	Impacto en el costo del dispositivo	Viabilid ad para DSSC semitra nsparen tes	Referencia
Convenci onal	Platino (Pt)	Muy alta	Alta eficiencia y FF elevado	Muy alto ($\approx 40-50\%$ del costo del electrod o)	Limitad a por costo	[20]
Alternativ o	Grafito / Hollín	Alta	Ligera reducci ón del FF	Muy bajo	Alta	[6]

Alternativ o	Carbon o amorfo	Moderada-alta	Eficien cia comparable en baja potenci a	Bajo	Alta	[20]
Alternativ o	WS ₂ /C arbono compu esto	Alta	Eficien cias reporta das hasta 4.25%	Significativ amente reducido	Muy alta	[14], [19]
Alternativ o	Carbón activad o	Moderada	Leve dismin ución de Voc	Muy bajo	Alta	[20]

Fuente: Resultados de los estudios [6], [14], [19], [20]

Basándose en los parámetros reportados por [1], [2], [3], [4], el diseño conceptual propone el uso de panel solar semi transparente basado en una celda solar sensibilizada por colorante natural, orientado a aplicaciones de bajo costo y generación energética distribuida. La propuesta integra los materiales y configuraciones más recurrentes y viables reportadas entre los años 2020 y 2025 [2], [5], priorizando la semitransparencia del dispositivo, la accesibilidad de los insumos y la compatibilidad con procesos de fabricación simples.

La arquitectura propuesta para el fotoánodo considera un sustrato de vidrio transparente conductor como soporte estructural y funcional del dispositivo, sobre el cual se deposita una capa de dióxido de titanio (TiO₂) con estructura mesoporosa. La literatura analizada identifica al TiO₂ como el semiconductor más utilizado en celdas solares sensibilizadas por colorante debido a su estabilidad química, bajo costo y adecuada alineación energética con colorantes naturales ricos en antocianinas [8], [12], [16]. Asimismo, estudios recientes destacan que el control del espesor y la morfología de la capa de TiO₂ permite mantener un compromiso adecuado entre absorción fotónica y transmisión de luz visible, condición esencial para aplicaciones semitransparentes [1], [2]. Adicionalmente, se ha reportado que modificaciones estructurales o dopajes del TiO₂ pueden contribuir a mejorar el transporte de electrones, compensando parcialmente las limitaciones de eficiencia asociadas al uso de tintes naturales, lo cual se considera en esta propuesta a nivel conceptual como una estrategia potencial de optimización [16].

TABLA 3. Características del foto ánodo reportadas en la literatura científica reciente para celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales

Material del foto ánodo	Función dentro de la DSSC	Ventajas reportadas	Limitaciones reportadas
-------------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

Vidrio conductor transparente (FTO / ITO)	Soporte estructural y colector de electrones; permite el paso de la radiación solar hacia el semiconductor	Alta transmitancia óptica, buena conductividad eléctrica y compatibilidad con arquitecturas semitransparentes	Costo mayor en comparación con vidrio convencional; posibles pérdidas ópticas por reflexión
Dióxido de titanio (TiO₂) mesoporoso	Semiconductor encargado de la inyección y transporte de electrones generados por el colorante sensibilizador	Alta estabilidad química, bajo costo, abundancia y adecuada alineación energética con colorantes naturales	Baja absorción en el visible; transporte electrónico limitado si no se optimiza la microestructura
Control de espesor del TiO₂	Regulación del balance entre absorción de luz y transmisión óptica	Permite ajustar la semitransparencia del dispositivo sin comprometer completamente la generación eléctrica	Capas demasiado delgadas reducen la eficiencia; capas gruesas disminuyen la transparencia
Modificación estructural o dopaje del TiO₂	Mejora del transporte de electrones y reducción de recombinación	Incremento del rendimiento eléctrico reportado en estudios recientes; compensación parcial de las limitaciones de los tintes naturales	Complejidad adicional en el proceso de fabricación; incremento potencial del costo
Superficie del TiO₂ sensibilizada con antocianinas	Absorción de la radiación visible y generación de electrones excitados	Uso de colorantes naturales de bajo costo; proceso de sensibilización simple; compatibilidad con aplicaciones sostenibles	Degradación del colorante con el tiempo; estabilidad limitada frente a radiación prolongada

Fuente: Datos recopilados a partir de la revisión de la literatura.

A partir de la evidencia reportada en los estudios seleccionados [8], [9], [12], se propone una configuración tipo sándwich característica de las celdas solares sensibilizadas por colorante, adaptada para un panel solar semitransparente de bajo costo. En esta arquitectura, la capa de TiO₂ es sensibilizada mediante un colorante natural rico en antocianinas, extraído de frutas de fácil acceso como mora o frambuesa, seleccionadas por su elevada capacidad de absorción en el rango visible y su afinidad química con la superficie del semiconductor [9], [18]. El sistema se complementa con un electrolito basado en un par redox, ampliamente reportado en la literatura para este tipo de dispositivos, el cual permite la regeneración del colorante tras la inyección de electrones [8], [12]. Para mejorar la estabilidad del sistema y facilitar su implementación en aplicaciones reales, se considera la posibilidad de emplear electrolitos en forma de gel, tal como ha sido sugerido en estudios recientes orientados a dispositivos fotovoltaicos para interiores [6], [10]. Finalmente, el

contraelectrodo se plantea a partir de materiales basados en carbono, específicamente carbón activado, como alternativa de bajo costo al platino, respaldada por investigaciones que demuestran su adecuada actividad electrocatalítica, estabilidad química y viabilidad económica en celdas DSSC orientadas a la sostenibilidad [11], [20].

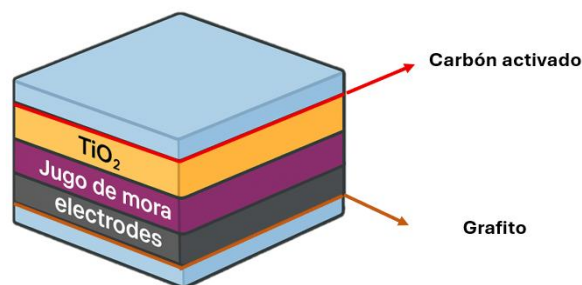


Fig. 3: Esquema del diseño conceptual del panel solar semitransparente propuesto

La literatura reciente indica que los paneles solares semitransparentes no están destinados a competir directamente con tecnologías fotovoltaicas convencionales basadas en silicio, sino a ocupar nichos de aplicación específicos donde la transmisión parcial de luz y la integración arquitectónica son requisitos fundamentales [1], [2], [3]. En este contexto, el diseño conceptual propuesto resulta particularmente relevante para aplicaciones en ventanas energéticamente activas, fachadas inteligentes, invernaderos y sistemas agrivoltaicos, donde la coexistencia entre generación eléctrica y paso controlado de radiación solar puede aportar beneficios adicionales [1], [2]. Diversos estudios señalan que el uso de colorantes naturales con tonalidades rojizas o violáceas permite filtrar selectivamente la radiación incidente, lo cual puede contribuir tanto a la reducción de carga térmica en edificaciones como a la optimización de condiciones lumínicas para el crecimiento vegetal [3], [4]. En este sentido, el panel propuesto se perfila como una solución viable para sistemas de baja potencia, tales como sensores ambientales, dispositivos IoT o aplicaciones rurales descentralizadas, donde el bajo costo, la simplicidad de fabricación y el uso de materiales accesibles constituyen factores determinantes [5], [6].

El análisis conjunto de los 20 estudios seleccionados permite identificar tendencias transversales que van más allá de los resultados individuales. En cuanto a eficiencia de conversión, los valores reportados se concentran consistentemente en el rango de 0.05% a 1.74% de PCE, siendo las antocianinas provenientes de frutos rojos como arándano, mora y flores como Alstroemeria las que superan de forma recurrente el umbral del 0.50%, mientras que fuentes vegetales de pigmentación verde o morada oscura, como espinaca y maíz morado, se mantienen por debajo del 0.15% [9], [15]. Esta brecha sugiere que la estructura molecular del pigmento y su afinidad química con la superficie del TiO₂ son factores más determinantes sobre la eficiencia que el método de extracción en sí mismo. En cuanto a materiales, el TiO₂ mesoporoso como fotoánodo y el electrolito líquido de I⁻/I₃⁻ aparecen de forma predominante en los estudios revisados, consolidándose como la arquitectura base del campo [8], [12]. Por otro lado, se observa una tendencia creciente hacia la sustitución del platino por materiales carbonosos en el contraelectrodo,

motivada principalmente por criterios tecno-económicos antes que por desempeño puro [6], [14], [20]. Finalmente, la inestabilidad fotoquímica del colorante natural frente a la radiación prolongada emerge como la limitación más recurrente a lo largo de la literatura analizada, presente en estudios de distintas regiones y condiciones experimentales, lo que la posiciona como la principal barrera que el campo debe resolver para avanzar hacia aplicaciones reales [15], [17].

Con base en los parámetros reportados por [9], [15], [18], el diseño conceptual establece que el proceso de sensibilización emplea un extracto de antocianinas purificado y estabilizado. Se propone el uso de una solución de extracción acidificada con ácido cítrico al 0.1% v/v, relación que permite mantener el pigmento en su forma de catión flavilio, optimizando la quimisorción sobre la superficie del semiconductor. Para el ensamblaje, el ánodo sensibilizado se une a un contraelectrodo de grafito de alta pureza, el cual actúa como catalizador de bajo costo en sustitución del platino. Este componente se deposita de forma dispersa sobre un segundo sustrato de FTO para permitir una transmitancia luminica residual del 20% al 30%, característica esencial para su aplicación en fachadas arquitectónicas.

El orden de colocación y sellado es crítico para la integridad del panel. Una vez que el ánodo ha sido inmerso en el tinte por un periodo de 18 a 24 horas, se procede al sellado perimetral utilizando una lámina de polímero termoplástico (tipo Surlyn) con un espesor de 25 μm, la cual define la distancia entre electrodos. Finalmente, el espacio interno se infiltra con un electrolito líquido de yoduro/triyoduro (I⁻/I₃⁻) en una concentración molar de 0.5 M de LiI y 0.05 M de I₂.

TABLA 4. Relación entre aplicaciones reportadas en la literatura y características del panel solar semitransparente propuesto

Aplicación reportada	Requisitos funcionales principales	Características del panel solar semi transparente que responden a la aplicación	Beneficios asociados
Ventanas solares en edificaciones	Transmisión parcial de luz, integración arquitectónica y reducción de carga térmica	Uso de vidrio transparente conductor y control del espesor del fotoánodo para permitir semitransparencia; colorantes naturales que filtran selectivamente la radiación solar	Iluminación natural combinada con generación eléctrica y mejora de la eficiencia energética del edificio
Fachadas activas y envolventes inteligentes	Estabilidad, estética y compatibilidad con superficies verticales	Arquitectura tipo sándwich de bajo espesor y uso de tintes naturales que aportan tonalidades visibles	Integración visual del sistema fotovoltaico y aprovechamiento energético de superficies no convencionales

Invernaderos y sistemas agrivoltaicos	Paso controlado de luz fotosintéticamente activa y generación eléctrica simultánea	Empleo de colorantes naturales con absorción selectiva en el visible y diseño semitransparente del dispositivo	Optimización de condiciones luminicas para cultivos y producción energética complementaria
Sistemas de baja potencia e IoT	Bajo costo, facilidad de fabricación y operación a baja intensidad luminica	Uso de materiales accesibles como TiO ₂ y carbón activado; compatibilidad con iluminación difusa o interior	Alimentación energética de sensores ambientales y dispositivos electrónicos de bajo consumo
Zonas rurales o contextos de recursos limitados	Accesibilidad de materiales y simplicidad tecnológica	Sustitución de materiales nobles por alternativas basadas en carbono y colorantes naturales	Potencial implementación de soluciones energéticas descentralizadas y sostenibles

IV. Discusión de resultados

Los resultados de esta revisión sistemática evidencian que, si bien las celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales presentan eficiencias de conversión inferiores a las DSSC basadas en sensibilizadores sintéticos, poseen un potencial técnico significativo cuando se evalúan bajo métricas de rendimiento por unidad de costo, baja huella de carbono y aplicaciones específicas de baja potencia. La evidencia recopilada entre 2020 y 2025 muestra que el parámetro de eficiencia no puede evaluarse de forma aislada, sino que debe interpretarse en conjunto con factores como la accesibilidad de los materiales, la simplicidad operativa de los procesos de fabricación y el nicho de aplicación del dispositivo [15], [17].

En este contexto, los resultados comparativos presentados en la Tabla 1 evidencian que las antocianinas extraídas de flores y frutas de bajo costo, particularmente aquellas provenientes de Alstroemeria, arándano y achiote, presentan una capacidad según los estudios revisados consistente para actuar como sensibilizadores efectivos en DSSC. El mayor rendimiento observado en el caso de Alstroemeria ($\eta \approx 1.74\%$) se atribuye a la elevada densidad de grupos funcionales capaces de anclarse químicamente a la superficie del TiO₂, favoreciendo la inyección electrónica y reduciendo procesos de recombinación, tal como ha sido reportado en estudios recientes sobre colorantes naturales ricos en antocianinas [9], [15]. Estos hallazgos refuerzan la validez de priorizar pigmentos vegetales con estructuras moleculares polihidroxiladas dentro de propuestas de diseño orientadas al bajo costo.

No obstante, la literatura analizada también revela que la eficiencia de las DSSC con colorantes naturales está fuertemente condicionada por el método de extracción y el solvente empleado.

Diversos autores coinciden en que el uso de solventes acidificados permite estabilizar las antocianinas en su forma catiónica, incrementando la absorción espectral y la estabilidad fotoquímica del tinte [5], [18]. Esta variabilidad metodológica explica en parte la dispersión de resultados reportados y justifica la necesidad de interpretar los valores de eficiencia como rangos orientativos más que como valores absolutos comparables de forma directa, aspecto que ha sido señalado como una limitación recurrente en revisiones recientes sobre DSSC naturales [17]. Por ello, cualquier propuesta de diseño conceptual debe especificar condiciones de preparación de los precursores y criterios de ensamblaje estandarizados que minimicen la incertidumbre en el rendimiento energético del panel solar resultante.

En relación con la arquitectura del dispositivo, los resultados sistematizados en la Tabla 3 confirman que el foto ánodo basado en TiO_2 mesoporoso continúa siendo el componente central para garantizar un balance adecuado entre estabilidad química, costo y desempeño electrónico. La evidencia reciente indica que el control del espesor del TiO_2 resulta crítico en configuraciones semitransparentes, ya que capas excesivamente gruesas mejoran la absorción de luz, pero reducen significativamente la transmitancia óptica, mientras que capas demasiado delgadas comprometen la generación de corriente [1], [2]. En este sentido, la propuesta de diseño conceptual presentada se alinea con las tendencias reportadas en la literatura, al priorizar un compromiso entre eficiencia energética y paso controlado de luz visible.

Asimismo, estudios recientes han demostrado que estrategias como el dopaje del TiO_2 , particularmente con elementos como el indio, pueden mejorar el transporte de electrones y reducir la recombinación de cargas, compensando parcialmente las limitaciones intrínsecas de los colorantes naturales [16]. La inclusión de esta estrategia a nivel conceptual en el diseño propuesto se encuentra respaldada por evidencia experimental que reporta incrementos medibles en el rendimiento fotovoltaico sin alterar de forma significativa la semitransparencia del dispositivo, lo que resulta especialmente relevante para aplicaciones arquitectónicas.

Uno de los aspectos más relevantes discutidos en este estudio es la sustitución del platino por materiales basados en carbono como contra-electrodos. Los resultados sintetizados en la Tabla 2 muestran que, si bien el platino presenta una actividad catalítica superior para la reacción redox I^-/I_3^- , su elevado costo representa una barrera significativa para la implementación de DSSC de bajo costo [20]. En contraste, materiales como grafito, carbón activado y compuestos carbonosos han demostrado una actividad catalítica adecuada y una reducción sustancial del costo total del dispositivo, con pérdidas de eficiencia relativamente moderadas [6], [14]. Esta relación costo-beneficio ha sido identificada como un factor clave para la viabilidad de DSSC en aplicaciones de baja potencia e interiores [12], [20].

Desde un enfoque técnico económico, diversos estudios coinciden en que la métrica más relevante para evaluar la competitividad de las DSSC con colorantes naturales no es la eficiencia máxima alcanzada, sino el costo por watt generado (W) [14]. Bajo este criterio, las configuraciones que emplean contra-electrodos de carbono y sensibilizadores naturales resultan claramente ventajosas frente a diseños convencionales basados en materiales

nobles, especialmente cuando se consideran aplicaciones distribuidas, rurales o de integración arquitectónica.

La discusión sobre aplicaciones reales, sintetizada en la Tabla 4, evidencia que las DSSC semitransparentes no compiten directamente con los paneles fotovoltaicos de silicio, sino que ocupan nichos específicos donde la transmisión parcial de luz y la estética del dispositivo son factores determinantes [1], [2], [3]. En particular, aplicaciones como ventanas solares, fachadas activas, invernaderos y sistemas agrivoltaicos se benefician de la capacidad de los colorantes naturales para filtrar selectivamente la radiación visible, reduciendo la carga térmica en edificaciones o modulando la luz fotosintéticamente activa en cultivos [1], [3], [4]. Estos resultados respaldan la pertinencia del diseño propuesto como una solución complementaria dentro del panorama de energías renovables.

Considerando el conjunto de evidencia analizada, es posible identificar hacia dónde se orienta el campo de las DSSC con colorantes naturales como tendencia global. Los estudios revisados convergen en que la combinación de fotoánodo de TiO_2 mesoporoso, sensibilizador antocianínico de frutos rojos, electrolito de I^-/I_3^- y contraelectrodo de carbono representa la arquitectura con mejor balance costo-desempeño para aplicaciones de baja potencia [8], [9], [12], [20]. En cuanto a aplicaciones, la integración arquitectónica ventanas solares y fachadas activas y la agrivoltaica son los nichos más frecuentemente citados como destino viable para esta tecnología, precisamente porque en esos contextos la semitransparencia y el bajo costo compensan la eficiencia moderada del dispositivo [1], [2], [3]. Asimismo, la variable que aparece con mayor peso sobre la eficiencia a lo largo de los estudios no es un único material, sino la interacción entre el solvente de extracción, el espesor del TiO_2 y la morfología de adsorción del colorante lo que indica que la optimización del proceso de fabricación tiene tanto impacto como la selección del pigmento en sí [5], [15], [18]. Estos patrones transversales refuerzan la validez del diseño conceptual propuesto en este trabajo, el cual integra precisamente los materiales y configuraciones que mayor respaldo acumulan en la literatura reciente.

Posteriormente, la integración de los resultados experimentales reportados en la literatura con la propuesta de diseño conceptual desarrollada en este estudio demuestra que es posible formular un modelo de panel solar semi transparente de bajo costo con fundamentos técnicos sólidos, aun en ausencia de validación experimental directa. La revisión sistemática permitió identificar tendencias consistentes en materiales, configuraciones y aplicaciones, reduciendo la incertidumbre asociada a la etapa de diseño preliminar y estableciendo una base clara para futuros estudios experimentales orientados a la fabricación y optimización del prototipo.

V. Conclusiones

El presente estudio abordó el análisis de las celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales desde una perspectiva integral, mediante una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025, con el objetivo de identificar avances, limitaciones y tendencias asociadas al uso de antocianinas extraídas de frutas de bajo costo y su aplicación en paneles solares semitransparentes. Los resultados obtenidos

permiten concluir que este tipo de tecnología representa una alternativa técnicamente viable y conceptualmente sólida para aplicaciones específicas donde la transparencia, la sostenibilidad y el bajo costo constituyen factores prioritarios.

La revisión sistemática evidenció que las antocianinas provenientes de fuentes vegetales como mora, frambuesa y especies ornamentales presentan una capacidad consistente para actuar como sensibilizadores en DSSC, gracias a su afinidad química con el dióxido de titanio y su adecuada absorción en el rango visible. No obstante, se determinó que el desempeño fotovoltaico no depende únicamente de la fuente biológica, sino que está estrechamente condicionado por la eficiencia del proceso de extracción y la cinética de adsorción del colorante sobre el semiconductor. Asimismo, la eficiencia de conversión energética se encuentra limitada en comparación con los colorantes sintéticos debido a la inestabilidad fotoquímica intrínseca y a procesos de recombinación electrónica, factores que subrayan la necesidad de optimizar la estabilidad del complejo pigmento-fotoánodo para garantizar un desempeño funcional a largo plazo.

En relación con la arquitectura del dispositivo, la literatura analizada sugiere que el fotoánodo basado en TiO_2 mesoporoso continúa siendo el componente más adecuado para DSSC semitransparentes, especialmente cuando se controla su espesor y microestructura para equilibrar la generación eléctrica y la transmisión de luz. Asimismo, se concluye que estrategias de modificación del semiconductor, como el dopaje o la optimización morfológica, constituyen enfoques prometedores para mejorar el transporte electrónico y compensar parcialmente las limitaciones asociadas al uso de colorantes naturales.

Respecto al contra-electrodo, los estudios revisados demuestran que los materiales basados en carbono, como el carbón activado, representan una alternativa viable al platino en términos de costo y sostenibilidad, con un desempeño electrocatalítico adecuado para el par redox comúnmente empleado en DSSC. Esta sustitución resulta especialmente relevante para el desarrollo de paneles solares de bajo costo orientados a aplicaciones de baja potencia e integración arquitectónica.

La propuesta de diseño conceptual derivada de esta investigación se define teóricamente como un panel solar semitransparente, cuya arquitectura se proyecta para maximizar la captación de fotones mediante recursos de bajo impacto. El dispositivo se estructura bajo una configuración de celda tipo sándwich, donde el componente central es un fotoánodo de vidrio conductor FTO (óxido de estaño dopado con flúor) recubierto con una película de dióxido de titanio (TiO_2) mesoporoso. Basado en la evidencia experimental reportada por da Conceição et al. [9], se establece un espesor de capa objetivo de 12 μm , valor identificado en la literatura como el punto de equilibrio que permitiría una porosidad suficiente para la adsorción del sensibilizador sin comprometer la transparencia del dispositivo. Asimismo, se sugiere la aplicación de protocolos de deposición estandarizados para la pasta de nanopartículas (como la proporción teórica 1:3 de óxido y aglutinante) para asegurar la estabilidad mecánica del film según lo descrito en estudios de manufactura de DSSC [15], [18].

Este diseño integrado permite que la generación eléctrica coexista con una estética visual semitransparente, ideal para sistemas

agrivoltaicos y ventanas inteligentes donde la eficiencia se complementa con la funcionalidad arquitectónica.

A partir de estos hallazgos, se formuló un diseño conceptual de panel DSSC semitransparente orientado a BIPV y agrivoltaica, priorizando materiales accesibles y criterios de diseño que permitan la coexistencia entre generación eléctrica y transmitancia lumínica. En conclusión, las DSSC sensibilizadas con antocianinas se posicionan como una alternativa complementaria para la generación distribuida de baja potencia en aplicaciones donde el balance entre estética, costo y sostenibilidad es determinante. No obstante, su adopción práctica a gran escala continúa condicionada por los desafíos inherentes a la estabilidad fotoquímica y la durabilidad a largo plazo del sistema pigmento-fotoánodo-electrolito, aspectos que deben guiar las futuras líneas de investigación experimental.

VI. Limitaciones y líneas futuras

A partir del diseño conceptual desarrollado en esta investigación, se establecen los pasos necesarios para la transición desde el modelo teórico hacia una solución tecnológica funcional. En primer lugar, se requiere el desarrollo de pruebas de validación experimental en laboratorio mediante la fabricación de prototipos a escala de celda unitaria. Esta etapa permitirá corroborar la eficiencia de conversión energética (\$PCE\$) de los extractos de *Alstroemeria*, mora y frambuesa bajo condiciones controladas, ajustando las proporciones de acidificación y los tiempos de sensibilización propuestos para reducir la incertidumbre identificada en la literatura.

En segundo lugar, es fundamental avanzar hacia la caracterización de la estabilidad y durabilidad del dispositivo. Se propone la ejecución de ensayos de degradación acelerada ante radiación UV prolongada y fluctuaciones térmicas, siguiendo protocolos internacionales de caracterización fotovoltaica. Estos estudios permitirán evaluar la integridad del complejo pigmento-semiconductor y la efectividad de los sistemas de sellado propuestos, garantizando que el panel pueda operar en entornos arquitectónicos reales sin una pérdida crítica de rendimiento.

Finalmente, se proyecta el escalamiento y la aplicación práctica del prototipo mediante el ensamblaje de módulos de mayor área para aplicaciones de Edificación Fotovoltaica Integrada (BIPV). Esta fase permitirá medir el desempeño del panel en nichos específicos, como invernaderos inteligentes o fachadas activas, donde la transmitancia lumínica y la generación eléctrica deben coexistir. Asimismo, se recomienda la optimización de los métodos de deposición para los contraelectrodos de carbono, asegurando que la sustitución de materiales críticos por alternativas de bajo costo mantenga una cinética de transferencia de carga eficiente en sistemas de mayor escala.

REFERENCIAS

- [1] Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S. S. (2022). Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 158, 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>

- [2] Huang, Y., Shen, C., Cai, C., Zhu, W., Liang, Y., Kalogirou, S. A., & Wang, J. (2025). Fabrication, efficiency loss analysis, and simulation-based optimization of semi-transparent perovskite solar cell modules for photovoltaic windows. *Solar Energy*, 299, 113721. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113721>
- [3] Suyitno, S., Muqoffa, M., Marlina, A., Adriyanto, F., & Basuki, B. (2024). Unlocking the potential of anthocyanin-based dye-sensitized solar cells: Strategies for enhancing efficiency, stability, and economic viability. *Journal Of Applied Research And Technology*, 22(2), 308-326. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2024.22.2.2298>
- [4] Singh, R. K., Srivastava, P. K., Tiwari, G. N., & Sinha, A. S. K. (2024). A sustainable floating dome biogas plants integrated with semi-transparent photovoltaic thermal collectors: Construction, production and economic analysis. *Journal Of Cleaner Production*, 475, 143706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143706>
- [5] Yuan, Z., Wu, T., Yang, J., Tsai, J., & Meen, T. (2024). Impact of Various Solvents on Extraction of Anthocyanins from Blueberry for Use in Dye-sensitized Solar Cells. *Sensors And Materials*, 36(3), 1179. <https://doi.org/10.18494/sam4729>
- [6] Sharma, N., Mittal, M., Saini, A., Singh, P., Kumari, A., Kumar, A., Jangra, P. K., Tiwari, P., Choudhary, S., & Verma, A. S. (2024). Affordable excellence: unveiling the potential of graphitic carbon-based counter electrodes for high-performance dye-sensitized solar cells. *Digest Journal Of Nanomaterials And Biostructures*, 19(4), 1975-1985. <https://doi.org/10.15251/djnb.2024.194.1975>
- [7] Arevalo, C. M., & Ccasa, T. N. (2024). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana a nivel mundial: Una Revisión Sistemática de la Literatura entre los años 2012 y 2022 [Artículo científico de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/40866>
- [8] Rahman, S., Haleem, A., Siddiq, M., Hussain, M. K., Qamar, S., Hameed, S., & Waris, M. (2023). Research on dye sensitized solar cells: recent advancement toward the various constituents of dye sensitized solar cells for efficiency enhancement and future prospects. *RSC Advances*, 13(28), 19508-19529. <https://doi.org/10.1039/d3ra00903c>
- [9] Da Conceição, L. R. B., Da Cunha, H. O., Leite, A. M. B., Babu, R. S., Raja, S., Ribeiro, C., & De Barros, A. L. F. (2023). Evaluation of Solar Conversion Efficiency in Dye-sensitized Solar Cells Using Natural Dyes Extracted from *Alpinia purpurata* and *Alstroemeria* Flower Petals as Novel Photosensitizers. *Colorants*, 2(4), 618-631. <https://doi.org/10.3390/colorants2040032>
- [10] Ituen, E., Okon, I., Usoro, R., Umana, S., Udoisoh, M., & Inyang, U. (2025). Harnessing Nature's Colours: Experimental and Computational Insights into Bixarellana Pigments for Next-Generation Dye-Sensitized Solar Cells. *Green Chemical Technology*, 2(3), 10010. <https://doi.org/10.70322/gct.2025.10010>
- [11] Castillo-Seoane, J., Contreras-Bernal, L., Riquelme, A. J., Fauvel, S., Kervella, Y., Gil-Rostra, J., Lozano, G., Barranco, A., Demadrille, R., Sanchez-Valencia, J. R., & Borrás, A. (2023). Multidimensional nanoarchitectures for improved indoor light harvesting in dye-sensitized solar cells. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2312.16663>
- [12] Devadiga, D., Selvakumar, M., Shetty, P., & Santosh, M. S. (2021). Dye-Sensitized Solar Cell for Indoor Applications: A Mini-Review. *Journal Of Electronic Materials*, 50(6), 3187-3206. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08854-3>
- [13] *Comportamiento de las células solares sensibilizadas por colorantes (DSSCs) en función de la intensidad de la luz. - Universidad de Zaragoza Repository*. (2022). <https://zaguan.unizar.es/record/125463>
- [14] Syed, T. H., & Wei, W. (2022). Technoeconomic Analysis of Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) with WS₂/Carbon Composite as Counter Electrode Material. *Inorganics*, 10(11), 191. <https://doi.org/10.3390/inorganics10110191>
- [15] Amogne, N. Y., Ayele, D. W., & Tsigie, Y. A. (2020). Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dye sensitized solar cell. *Materials For Renewable And Sustainable Energy*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s40243-020-00183-5>
- [16] Ayaz, M., Hijji, M., Alatawi, A. S., Namazi, M., & Ershath, M. M. (2024). Improving charge transfer properties and solar cell performance by In-doped TiO₂ as an efficient photoanode for dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Journal Of Physics And Chemistry Of Solids*, 188, 111913. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.111913>
- [17] Prajapat, K., Mahajan, U., Sahu, K., Dhonde, M., & Shirage, P. M. (2024). The Evolution of natural Dye-Sensitized solar Cells: Current Advances and future outlook. *Solar Energy*, 284, 113081. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113081>
- [18] Teja, A. S., Srivastava, A., Satrugna, J. A. K., Tiwari, M. K., Kanwade, A., Yadav, S. C., & Shirage, P. M. (2022b). Optimal processing methodology for futuristic natural dye-sensitized solar cells and novel applications. *Dyes And Pigments*, 210, 110997. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110997>
- [19] Kumar, R., Sahajwalla, V., & Bhargava, P. (2019). Fabrication of a counter electrode for dye-sensitized solar cells (DSSCs) using a carbon material produced with the organic ligand 2-methyl-8-hydroxyquinolinol (Mq). *Nanoscale Advances*, 1(8), 3192-3199. <https://doi.org/10.1039/c9na00206e>

- [20] Tseng, C., & Lee, C. (2020). Highly Active Carbon-Based Electrocatalysts for Dye-Sensitized Solar Cells: A Brief Review. *Physics*, 2(3), 412-424.
<https://doi.org/10.3390/physics2030023>