



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**PIGMENTOS NATURALES EXTRAÍDOS DE HONGOS Y LIQUENES COMO
SENSIBILIZADORES EN CELDAS SOLARES DSSC Y SU OPTIMIZACIÓN
MEDIANTE NANOPARTÍCULAS**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

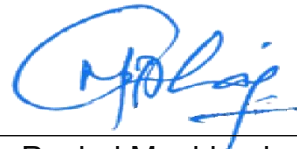
POR: Dillan Esteban Nebreda García
Profesor Guía: Dr. Paulraj Manidurai

Mayo, 2025
Concepción, Chile

© 2025, Dillan Esteban Nebreda García
Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

EVALUACIÓN DE PIGMENTOS NATURALES EXTRAÍDOS DE HONGOS Y
LIQUENES COMO SENSIBILIZADORES EN CELDAS SOLARES DSSC Y SU
OPTIMIZACIÓN MEDIANTE NANOPARTÍCULAS

Profesor Guía



Paulraj Manidurai
Profesor Asociado
Físico, PhD.

Profesor Guía



Götz Palfner
Profesor Asociado
Biólogo, Dr.

Profesor Guía



Eduardo Peña F.
Profesor Asociado
Ingeniero Forestal, Dr.

DEDICATORIA

*“A mi hermano Heins, por los incontables viajes a urgencia, sin los cuales yo no
estaría aquí”*

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que, de distintas formas, fueron fundamentales para que esta tesis viera la luz. A cada una de ellas, gracias por haber sido parte de este camino.

Quiero comenzar agradeciendo a Lester Riquelme y a don Ricardo León, por haberme facilitado el material que hizo posible este trabajo.

Al profesor Paulraj Manidurai, por brindarme la oportunidad de trabajar en su laboratorio y confiar en mi capacidad.

A Bayron Cerda, por ser mi guía en el laboratorio y siempre estar dispuesto a ayudar.

A mis compañeros y amigos Carlos, Cata, Cami, Bárbara, y muy especialmente a Nicolás (Chilote) y Magda, por estar ahí en los momentos difíciles, por su guía, por su cariño y por motivarme a dar término a esta etapa con determinación.

A Camila Chaparro, porque el simple gesto de prestarme su bicicleta para ir a inscribir el ramo de hongos marcó el inicio del camino que me llevó a descubrir la micología.

A Marcela Gonzales, por todo lo que hizo por mí durante los años en que estuve bajo su cuidado, y también después. Son demasiadas cosas como para enumerarlas todas; siempre estaré en deuda con usted.

A Patricia Thompson, por su ternura, su cuidado constante y sus palabras de aliento que me ayudaron a seguir adelante.

Agradezco profundamente al profesor Götz Palfner, por aceptar trabajar conmigo, por su guía paciente durante todos estos años y por ofrecerme su apoyo incluso más allá de lo académico. Es, sin duda, una de las mejores personas que he tenido el privilegio de conocer.

A mis pequeños, por darme fuerza cuando sentía que no quedaba ninguna.

A mis hermanos, por su amor constante, por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía, y por recordarme, con su ejemplo y su presencia, que nunca estoy solo en este camino.

A Felipe, Ignacio y Sade: no existen hojas suficientes para expresar todo lo que les agradezco. Solo puedo decir que, sin ustedes, no habría llegado hasta aquí.

Y, por último, a mí, por no rendirme. Por sostenerme en los momentos más oscuros. Por seguir, a pesar de todo. Ese, sin duda, ha sido uno de mis mayores logros.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA	10
2.1. Recolección de muestras	10
2.2. Preparación de muestras.....	13
2.3 Extracción de pigmentos.....	14
2.4 Análisis del espectro fotométrico de los extractos	15
2.5 Preparación de celdas de TiO ₂	17
2.5.1 Preparación de la pasta de TiO ₂	17
2.5.2. Preparación de los vidrios.....	18
2.5.3. Sensibilización de celdas	22
2.5.4. Preparación del contraelectrodo	22
2.6 Medición de celdas	23
2.7. Análisis de datos	27
2.7.1 Picos de absorbancia.....	27
2.7.2. Datos de eficiencia.....	28
2.7.3 Curva de I-V.....	28
2.8. Producción de nanopartículas	29
2.8.1 Formación de nanopartículas.....	30
2.8.2 Extracción de nanopartículas.....	31
2.8.3. Sensibilización con nanopartículas	32
III. RESULTADOS	34
3.1. Caracterización espectrofotométrica de los extractos en distintos alcoholes.....	34
3.2 Identificación de pigmentos asociados a las longitudes de onda	37
3.3. Eficiencia y <i>Fill Factor</i> (FF) de las DSSC.....	41
3.3.1 Análisis de la eficiencia de conversión energética.....	41
3.3.2. Análisis del Fill Factor (FF).....	42
3.3.3. Análisis de las curvas corriente-voltaje (Gráficos I-V).....	44
3.4. Eficiencia de DSSC con nanopartículas	47
IV. DISCUSIÓN	51
4.1 Comparación con estudios previos sobre DSSC con pigmentos naturales	51
4.2 Incorporación de nanopartículas y su efecto en la eficiencia fotovoltaica	52
4.3 Impacto del solvente y la selección de pigmentos	52
4.4. Eficiencia de <i>Xanthoria parietina</i>	53
4.5 Implicaciones y direcciones futuras	54
V. CONCLUSIÓN	56
VI. GLOSARIO	57

VII. BIBLIOGRAFÍA	62
VIII. APÉNDICE.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Identificación de los pigmentos asociados a los picos detectados en las curvas de absorbancia UV-vis obtenidos de <i>P. otreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , en etanol, metanol y hexano. En el rango de 250 al 750 nm.	40
Tabla 3.2 Datos de conversión energética (Eficiencia, J_{sc} , V_{oc} y FF) obtenidos de las mediciones de las DSSC en base de TiO_2 con pigmento de <i>P. otreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente, extraídos en etanol, metanol y hexano. Con una irradiancia de 1000 W cm^{-2}	43
Tabla 3.3 Datos de conversión energética (Eficiencia, J_{sc} , V_{oc} y FF) obtenidos de las mediciones de las DSSC en base de TiO_2 con pigmento de <i>X. parietina</i> extraído en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de <i>P. otreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , con una irradiancia de 1000 W cm^{-2}	49
Tabla 8.1 Datos completos de conversión energética de las DSSC en base de TiO_2 con pigmento de <i>P. otreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente, extraídos en etanol, metanol y hexano. entregados por el Simulador Solar donde $P.o.$ = <i>P. otreatus</i> , $S.h.$ = <i>S. hirsutum</i> y $X.p$ = <i>X. parietina</i>	68
Tabla 8.2 Datos completos de conversión energética de las DSSC en base de TiO_2 con pigmento de <i>X. parietina</i> extraído en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de <i>P. otreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , entregados por el Simulador Solar donde $P.o.$ = <i>P. otreatus</i> , $S.h.$ = <i>S. hirsutum</i> y $X.p$ = <i>X. parietina</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 <i>Xanthoria parietina</i> sobre corteza de <i>Fraxinus</i> sp. en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío, en el mes de noviembre 2024 (36°45'S, 73°05'O).	11
Figura 2.2 <i>Pleoratus ostraetus</i> . Foto: Fred Stevens. Mykoweb. Extraída de https://www.mykoweb.com/CAF/species/Pleurotus_ostreatus.html	12
Figura 2.3 <i>Stereum hirsutum</i> sobre tronco cortado de <i>Nothofagus obliqua</i> . Campus Naturaleza de la Universidad de Concepción, Región del Biobío, el 12 de octubre del 2024 (36°50'13.8"S 73°01'28.3"O).	13
Figura 2.4. Proceso de maceración de <i>Xanthoria parietina</i> en etanol metanol y hexano.	15
Figura 2.5 Proceso de filtrado de extractos obtenidos de la maceración de <i>X. parietina</i> luego de 72 horas. a) Extracto en metanol. b) Extracto en etanol. c) Extracto en hexano.	15
Figura 2.6 Espectrofotómetro V-760, Jasco®.	16
Figura 2.7 Mezcla de TiO ₂ agitándose en agitador magnético	18
Figura 2.8 Limpiador ultrasónico analógico VWR de 2,8 litros, modelo B2500E-MTH.	19
Figura 2.9 Recubridor por centrifugado, modelo ws-650mz-23nppb, Laurell®.	20
Figura 2.10 Vidrio FTO cubierto por la película de TiO ₂ (a) representación esquemática de la vidrio cortado y limpiado (b) porción (blanco) recubierto con TiO ₂ , (c) muestra de la placa actual preparado.	20
Figura 2.11 Vidrios FTO sobre soporte de greda en disposición para ser horneados. Imagen referencial	21
Figura 2.12 Horno tubular Leiton®.	21
Figura 2.13 Proceso de sensibilización de DSSC con extracto de metanol de <i>X. parietina</i> . a) vidrios FTO con una película de TiO ₂ . b) celdas de TiO ₂ sumergidas en pigmento. c) celdas luego de 72 horas de sensibilización son el solvente evaporado.	22
Figura 2.14 Diagramas de armados de la celda solar. 1) Paso 1. Fotoelectrodo y contraelectrodos unidos por el electrolito. 2) Paso 2. Conexión de los multímetros (cables). Vista de frente. 3) Conexión de los multímetros. Vista de lado.	24
Figura 2.15 Fotografía de la celda (DSSC) armada y lista para medir. Extraída de White (2020).	24
Figura 2.16 Diagrama del funcionamiento de una DSSC en base a TiO ₂ y pigmento (Jamalullail et al., 2017)	25
Figura 2.17 Imagen del programa OriginPro 2024b, mostrando el resultado de la transformación de los datos.	29

Figura 2.18 Procesos en agitador magnético. a) muestra de <i>X. parietina</i> en agua destilada. b) extracto resultante de <i>X. parietina</i> mezclada con solución de sal de plata (AgNO ₃).....	31
Figura 2.19 Centrifuga con 12 tubos Eppendorf con solución del extracto de <i>X. parietina</i> con nanopartículas.....	32
Figura 2.20 Esquema de la estructura de una DSSC en base a TiO ₂ + pigmentos, con nanopartículas de oro integradas (GNPs) (Chen, Chen, & Tseng, 2010)...	33
Figura 3.1 Gráfico de absorbancia en el rango UV-vis (200-350 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de <i>P. ostreatus</i> , macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.....	35
Figura 3.2 Gráfico de absorbancia en el rango UV-vis (200-500 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de <i>S. hirsutum</i> , macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.....	36
Figura 3.3 Gráfico de absorbancia en el rango UV-vis (200-750 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de <i>X. parietina</i> , macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.....	37
Figura 3.4 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO ₂ y pigmentos de <i>P. ostreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente, extraídos en etanol. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm ⁻²	45
Figura 3.5 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO ₂ y pigmentos de <i>P. ostreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente, extraídos en hexano. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm ⁻²	46
Figura 3.6 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO ₂ y pigmentos de <i>P. ostreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente, extraídos en metanol. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm ⁻²	47
Figura 3.7 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO ₂ y extracto de <i>X. parietina</i> macerado en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de <i>P. ostreatus</i> , <i>S. hirsutum</i> y <i>X. parietina</i> , respectivamente. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm ⁻²	50

RESUMEN

Las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) con pigmentos naturales son una opción sustentable para convertir luz solar en energía. En este trabajo se usaron pigmentos de los hongos *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum* y el líquen *Xanthoria parietina* como colorantes en DSSC, usando etanol, metanol y hexano como solventes. Los espectros UV-Vis mostraron absorción entre 250 y 750 nm, asociada a compuestos fenólicos, melaninas y parietina. Se midió la eficiencia de las celdas y el factor de llenado (FF). La mejor eficiencia fue con *X. parietina* en metanol: 0,047%, Jsc de 0,15 mA/cm², Voc de 0,52 V y FF de 0,6 (área de 3,5 cm²). También se usaron nanopartículas metálicas de los mismos organismos en celdas con *X. parietina* en metanol, alcanzando una eficiencia de 0,037%, mayor que la celda base con solo TiO₂ (0,019%), pero menor que la versión sin nanopartículas. El FF también bajó levemente. Los resultados muestran que hongos y líquenes pueden ser una fuente útil de pigmentos para DSSC, y que el tipo de solvente y las nanopartículas influyen en el desempeño.

Palabras clave: Celdas solares DSSC, pigmentos naturales, espectroscopía UV-Vis, nanopartículas metálicas, síntesis verde.

ABSTRACT

Dye-sensitized solar cells (DSSC) using natural pigments are a sustainable option for converting sunlight into energy. In this study, pigments from the fungi *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum*, and the lichen *Xanthoria parietina* were tested as sensitizers in DSSC, using ethanol, methanol, and hexane as solvents. UV-Vis spectra showed absorption between 250 and 750 nm, linked to phenolic compounds, melanins, and parietin. The cells' efficiency and fill factor (FF) were measured. The best result was with *X. parietina* in methanol: 0.047% efficiency, J_{sc} of 0.15 mA/cm², V_{oc} of 0.52 V, and FF of 0.6 (3.5 cm² area). Metallic nanoparticles from the same organisms were also used in DSSC with *X. parietina* in methanol, reaching 0.037% efficiency—higher than the TiO₂-only base cell (0.019%) but lower than without nanoparticles. FF also decreased slightly. The results show that fungi and lichens can be useful pigment sources for DSSC, and that solvent type and nanoparticles affect performance.

I. INTRODUCCIÓN

Las emisiones globales de dióxido de carbono han aumentado de forma alarmante, alcanzando aproximadamente 59 gigatoneladas de CO₂ en 2019, un 54% más que en 1990 (IPCC, 2023). Este crecimiento constante ha elevado la temperatura global en 1.1°C entre 2011 y 2020 en comparación con los niveles preindustriales, un cambio impulsado principalmente por el uso intensivo de combustibles fósiles. Esta tendencia, impulsada por la actividad humana, plantea una amenaza directa al equilibrio climático, haciendo indispensable la transición hacia fuentes de energía sostenibles para asegurar un futuro habitable (IPCC, 2023).

Ante este desafío, la energía solar se presenta como una de las fuentes renovables más accesibles y limpias, con el potencial de satisfacer una parte significativa de la demanda energética global sin emitir gases de efecto invernadero. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la tecnología de celdas solares enfrenta desafíos importantes. Algunas, como las celdas de α -Si, sufren de baja eficiencia y degradación inducida por la luz, afectando su estabilidad en aplicaciones a gran escala. Otras, como las celdas de CdTe y CIGS, están limitadas por el uso de materiales tóxicos como el cadmio y elementos escasos como el telurio e indio, que restringen su escalabilidad y sostenibilidad ambiental (Lee & Ebong, 2016).

En respuesta a los desafíos de sostenibilidad en la tecnología solar, los investigadores han comenzado a explorar materiales biológicos como alternativas para sensibilizar celdas solares. Los hongos, en particular, ofrecen un gran potencial gracias a su capacidad de producir pigmentos naturales con propiedades ópticas y químicas adecuadas para absorber y transferir energía lumínica (Tropea *et al.* 2024).

El Reino Fungi se presenta como uno de los grupos más diversos y menos explorados de la biosfera, con una estimación de hasta 3,8 millones de especies, aunque sólo unas 120,000 han sido descritas formalmente (Hawksworth & Lücking 2017). Esta diversidad incluye organismos que varían desde microorganismos unicelulares, como las levaduras, hasta estructuras multicelulares complejas, como los basidiomicetos. Los hongos desempeñan roles ecológicos cruciales: son descomponedores primarios de materia orgánica, mutualistas esenciales en simbiosis con plantas, y patógenos que impactan a plantas y animales. Esta amplia variedad de formas y funciones los convierte en componentes vitales en la mayoría de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Webster & Weber 2007).

Los hongos se caracterizan por un estilo de vida heterótrofo y una nutrición por absorción, lo que significa que secretan enzimas al medio para descomponer la materia y luego absorben los nutrientes liberados. Su estructura básica, el

micelio, está formado por hifas, que son filamentos tubulares que permiten una rápida colonización del sustrato (Webster & Weber, 2007). Además, los hongos presentan una diversidad en sus formas de reproducción, con ciclos de vida que incluyen fases sexuales y asexuales, adaptándose eficientemente a distintos ambientes. Estas adaptaciones celulares y metabólicas han permitido a los hongos ocupar una variedad de hábitats y desempeñar funciones biológicas esenciales (Webster & Weber, 2007).

Los hongos han sido reconocidos desde hace siglos por su capacidad para producir una variedad impresionante de compuestos bioactivos, que incluyen antibióticos, enzimas, ácidos orgánicos y pigmentos (Massis et al. 2021). Desde el descubrimiento de la penicilina desde el hongo *Penicillium notatum* en 1928, los hongos han revolucionado la biotecnología moderna, estableciéndose como una fuente invaluable de metabolitos secundarios con aplicaciones médicas, industriales y agrícolas (Arce-Torres et al. 2020; Feijóo et al. 2021).

La diversidad metabólica de los hongos ha comenzado a ser explorada en el ámbito de las energías renovables, destacándose como productores de pigmentos naturales con propiedades ópticas y químicas que los posicionan como una alternativa sostenible en la tecnología solar (Narsing et al. 2017).

Tropea et al. (2024) indica que las características para tener una ventaja sobre los compuestos de origen vegetal son principalmente que la producción sea

menos demandante en recursos, no dependa de condiciones estacionales y pueda realizarse a gran escala. Estas ventajas están presentes en numerosas especies de hongos, principalmente en hongos cultivables, más que silvestres, lo cual responde a la demanda creciente de productos ecológicos y sostenibles en distintas industrias, incluyendo la de la energía solar (Lagashetti *et al.* 2019). Estos atributos hacen de los pigmentos fúngicos una opción prometedora para explorar su potencial como sensibilizadores en celdas solares, aprovechando sus propiedades para la captación de luz y contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias. Si bien la exploración de pigmentos fúngicos para aplicaciones en celdas solares ya ha demostrado su potencial (Durán *et al.*, 2005; Naveen & Prasad, 2013; Sheikhloo *et al.*, 2011; Silveira 2016; Singh *et al.* 2021) la investigación se ha limitado a un conjunto restringido de especies.

Para aumentar la eficiencia en la captura de luz en celdas solares, el uso de nanopartículas ha demostrado ser una estrategia efectiva. Estas pequeñas estructuras permiten una mejor absorción y dispersión de luz, originan plasmones de superficie localizados, que son oscilaciones colectivas de los electrones libres que concentran el campo electromagnético alrededor de la partícula y refuerzan la interacción fotón-pigmento (Li *et al.* 2023); un fenómeno descrito en detalle por Mcoyi *et al.* (2024), donde los electrones libres oscilan colectivamente y concentran el campo electromagnético en la vecindad de la partícula. Así la presencia de nanopartículas incrementa la eficiencia en la conversión de energía

en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSCs) (Rotondella 2024; Chava *et al.* 2024).

Las nanopartículas de materiales como el TiO₂ proporcionan más superficie para la adsorción de colorantes y facilitan el movimiento de electrones, lo que contribuye a una mayor eficiencia energética (Chava *et al.* 2024). Sin embargo, la producción convencional de nanopartículas emplea materiales tóxicos, incluidos solventes y surfactantes, que pueden generar un impacto negativo en el medioambiente. En contraste, la síntesis verde se presenta como una alternativa sostenible para la bioproducción de nanopartículas, incluyendo materiales metálicos como oro, plata, hierro y óxidos metálicos, con el objetivo de reducir el uso de sustancias nocivas y minimizar la contaminación ambiental (Boroumand Moghaddam *et al.*, 2015, citado en Gómez-Garzón, 2018). Al combinar esta tecnología con pigmentos naturales de hongos, se abre una nueva posibilidad para desarrollar sensibilizadores sostenibles.

Se han identificado varias clases principales de pigmentos, entre las que destacan las melaninas, carotenoides, quinonas y azafilonas, cada una con funciones biológicas específicas, por ejemplo:

- Las melaninas: Son pigmentos polimerizados que desempeñan un papel esencial en la protección contra la radiación ultravioleta y el estrés oxidativo, contribuyendo a la supervivencia en ambientes hostiles

(Cordero & Casadevall, 2017). Estas moléculas no solo absorben la luz, sino que también actúan como agentes antioxidantes, minimizando el daño celular en condiciones de alta radiación o estrés ambiental.

- Los carotenoides: Son responsables de tonalidades que varían del amarillo al naranja, cumplen funciones antioxidantes y son cruciales en la protección celular frente a la acumulación de radicales libres. Además, su capacidad para modular la membrana celular y participar en la fotoprotección ha sido documentada en diversos estudios (Pal & Rai, 2019).
- Las quinonas y las azafilonas: Generan pigmentaciones rojas y amarillas intensas, están involucradas en procesos de defensa y comunicación intracelular. Estas moléculas pueden interactuar con rutas metabólicas clave y, en algunos casos, presentar propiedades antimicrobianas, lo cual sugiere que su presencia no es meramente estética, sino que forma parte de estrategias de supervivencia y adaptación (Carvalho et al., 2014; Dufossé, 2011).

La caracterización de estos pigmentos ha sido abordada mediante técnicas analíticas avanzadas. Estudios como los de Gill (2003) y Velisek & Cejpek (2011) han empleado espectrofotometría y cromatografía líquida para establecer perfiles espectrales y determinar la estabilidad de los pigmentos, lo que ha permitido una clasificación más precisa en función de su estructura química y condiciones de producción. Asimismo, Zhou & Liu (2010) profundizan en la comprensión de las

rutas biosintéticas, demostrando cómo factores ambientales y las condiciones de cultivo pueden modular la biosíntesis y, por ende, la diversidad de pigmentos en los hongos.

Los pigmentos derivados de hongos, procesados en forma de nanopartículas, pueden captar y utilizar mejor la luz solar, optimizando su función en celdas solares. Esta combinación entre nanopartículas y pigmentos naturales no solo apoya el avance de tecnologías energéticas más limpias, sino que también reduce la dependencia de materiales sintéticos, alineándose con objetivos de sostenibilidad y conservación del medio ambiente (Chava *et al.* 2024).

En los primeros trabajos con DSSC se usaron tintes vegetales (antocianinas y betalainas) y se obtuvieron eficiencias entre 1 y 3 % (Calogero *et al.*, 2012; Jamalullail *et al.*, 2017). Más recientemente, algunos estudios probaron colorantes de hongos como *Monascus*, *Trichoderma* o *Pycnoporus* y lograron alrededor de 0,3 % de eficiencia sin químicos tóxicos (Durán *et al.*, 2005; Silveira, 2016; Singh *et al.*, 2021). Por otro lado, añadir nanopartículas de oro o plata produce un “efecto plasmón” que refuerza la luz cerca del colorante y puede aumentar la corriente hasta 25% (Li *et al.*, 2023; Chava *et al.*, 2024). Sin embargo, no se ha combinado todavía pigmentos de hongos con nanopartículas “verdes” hechas del mismo organismo fúngico.

Aunque actualmente los pigmentos fúngicos presentan una eficiencia menor comparada con otros sensibilizadores, sus características de biodegradabilidad, disponibilidad y menor impacto ambiental los hacen una opción atractiva para la investigación futura en celdas solares. La meta es desarrollar celdas solares que logren un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y accesibilidad económica, alineándose con los principios de conservación de recursos y sostenibilidad tecnológica (Dhorkule *et al.* 2024).

Esta investigación busca contribuir al campo de la ciencia de materiales y la energía renovable al ampliar lista de especies, explorando nuevas variedades de hongos que pueden producir pigmentos con propiedades ópticas y químicas favorables para la sensibilización de celdas solares, al identificar y caracterizar pigmentos de especies no estudiadas previamente, promoviendo alternativas sostenibles y reduciendo la dependencia de materiales sintéticos.

En consecuencia, se plantea la hipótesis de que los pigmentos extraídos de *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum* y *Xanthoria parietina* funcionan como colorantes activos en celdas DSSC y, al mismo tiempo, incrementan su eficiencia de conversión luminosa. Para comprobarla, se evaluará de forma directa la respuesta eléctrica de cada dispositivo midiendo la eficiencia (η), la corriente de cortocircuito (J_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}); con esos valores se obtendrá el Fill Factor (FF), que resume las pérdidas internas y la calidad global de la curva potencia-voltaje. Conviene recordar que el trabajo se limita a extractos

sin purificación cromatográfica, a ensayos de estabilidad a corto plazo y a caracterización óptica en el rango UV-Vis (250-750 nm); estos límites bastan para comparar especies y la selección de disolventes, pero dejan abierta la puerta a estudios más profundos. Bajo ese marco, el objetivo general es establecer el potencial de los pigmentos de las tres especies como sensibilizadores en DSSC, considerando su espectro de absorción, la eficiencia fotovoltaica lograda y el efecto de nanopartículas metálicas obtenidas por síntesis verde. De manera específica se buscará, primero, caracterizar los extractos en etanol, metanol y hexano e identificar los pigmentos responsables de cada pico de absorción; segundo, determinar la eficiencia, J_{sc} , V_{oc} y el FF de las celdas teñidas con esos extractos y analizar cómo influye el solvente; y, por último, incorporar nanopartículas derivadas de los mismos hongos y líquenes, comparando el rendimiento de las celdas con y sin estas nanoestructuras para revelar su contribución real al proceso fotovoltaico.

II. METODOLOGÍA

2.1. Recolección de muestras

Las muestras seleccionadas corresponden a dos especies de hongos y una de líquen: *Stereumhisutum* (Willd.) Pers., *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., respectivamente. Los hongos fueron elegidos por su capacidad de cultivo y la escasez de estudios previos sobre su aplicación en DSSC y nanopartículas, lo que permite explorar su potencial en nuevas tecnologías. *Xanthoria parietina* se incluyó debido a su contenido en parietina y otros pigmentos con absorción en el espectro visible (Lorenz *et al.* 2024), así como su amplia disponibilidad natural, lo que facilita su obtención sin requerir cultivos controlados.

- ***Xanthoria parietina***: Muestra de origen silvestre, obtenida de árboles de *Fraxinus sp.* en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío, en el mes de noviembre. Este líquen es cosmopolita, con capacidad de crecer durante todo el año bajo una amplia gama de condiciones climáticas.



Figura 2.1 *Xanthoria parietina* sobre corteza de *Fraxinus* sp. en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío, en el mes de noviembre 2024 (36°45'S, 73°05'O).

- ***Pleurotus ostreatus***: Cultivado por un micólogo aficionado en Concepción, Región del Biobío. Dicho cultivo se realizó bajo condiciones controladas que incluyen un rango de temperatura entre 20°C y 24°C, una humedad relativa del 85% al 90%, y buena ventilación para evitar acumulaciones de dióxido de carbono. Se utilizó un sustrato de aserrín. La iluminación fue mínima, con un fotoperiodo aproximado de 12 horas de luz difusa al día.



Figura 2.2 *Pleoratus ostraetus*. Foto: Fred Stevens. Mykoweb. Extraída de https://www.mykoweb.com/CAF/species/Pleurotus_ostreatus.html

- ***Stereum hirsutum***: Muestra de origen silvestre, recolectada de troncos de *Nothofagus obliqua* en descomposición en el Campus Naturaleza de la Universidad de Concepción, Concepción, Región del Biobío el 12 de octubre del 2024 (36°50'13.8"S 73°01'28.3"O). Esta especie crece en ambientes húmedos y sombreados, principalmente en madera en descomposición, lo que facilita su desarrollo en diversas estaciones del año.



Figura 2.3 *Stereum hirsutum* sobre tronco cortado de *Nothofagus obliqua*. Campus Naturaleza de la Universidad de Concepción, Región del Biobío, el 12 de octubre del 2024 (36°50'13.8"S 73°01'28.3"O).

La metodología utilizada en esta investigación sigue, en su mayoría, los procedimientos establecidos en el laboratorio de Termo-óptica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción, para la formación de DSSC's y nanopartículas, principalmente las metodologías desarrolladas por Cerda (2015) y White (2020).

2.2. Preparación de muestras

Las muestras obtenidas se gramaron en fresco dando los siguientes valores: *P. ostreatus*: 432 gramos, *S. hirsutum*: 358 gramos, y *X. parietina*: 543 gramos. Se limpiaron con agua destilada para eliminar rastros de sustrato, organismos o

contaminantes. Posteriormente, se deshidrataron en una bandeja de aluminio durante 48 horas a 25°C utilizando una horno-deshidratadora industrial.

2.3 Extracción de pigmentos

Para la extracción de pigmentos, se seleccionaron tres solventes: etanol, metanol y hexano. Estos solventes fueron elegidos debido a su polaridad y/o su uso previo para extracción de pigmentos, como en el caso del hexano. El tener una variada lista de solventes de diferentes polaridades, permite extraer diferentes tipos de compuestos presentes en las muestras.

Se pesaron 15g de material seco por especie y se distribuyeron en cuatro vasos precipitados de 100 ml por especie, asignando un vaso para cada solvente. Cada vaso contenía 5g de muestra triturada. Los vasos se sellaron con Parafilm, y en el caso del hexano, también con papel aluminio para evitar la evaporación (figura 2.4). Las muestras se dejaron macerar durante 72 horas. Una vez completado el proceso de maceración, los extractos fueron filtrados utilizando papel filtro (figura 2.5) y almacenados en tubos Falcon para ser refrigerados a 4°C aproximadamente para su posterior análisis (White, 2020).



Figura 2.4. Proceso de maceración de *Xanthoria parietina* en etanol metanol y hexano.



Figura 2.5 Proceso de filtrado de extractos obtenidos de la maceración de *X. parietina* luego de 72 horas. a) Extracto en metanol. b) Extracto en etanol. c) Extracto en hexano.

2.4 Análisis del espectro fotométrico de los extractos

Los extractos obtenidos de la maceración fueron analizados mediante espectroscopía UV-Vis para determinar sus rangos de absorción. Se utilizó un espectrofotómetro modelo Jasco V-760 UV-Vis/NIR de JASCO® con un rango de

medición entre 200 y 800 nm (margen de error instrumental de $\pm 0,8$ nm). Este rango abarca el espectro ultravioleta cercano (UV), el visible y parte del infrarrojo cercano (IR), lo que incluye la mayor parte del rango de radiación de la luz solar. Primero, se llenó una cubeta de cuarzo con 3mL del solvente correspondiente para establecer una línea base; terminada esta medición se vació la cubeta. Posteriormente, se añadió 1mL a la cubeta del extracto a medir y se completó con el mismo solvente utilizado en el extracto hasta alcanzar el volumen total de 3 ml. Este procedimiento se repitió para cada extracto y su respectivo solvente, es decir, tres extractos por solvente. Si una muestra presentaba saturación en la absorción, se reducía la concentración del extracto a la mitad y se repetía el proceso hasta obtener una medición adecuada (sin saturación o saturación bajo los 250 nm) (White, 2020).



Figura 2.6 Espectrofotómetro V-760, Jasco®.

2.5 Preparación de celdas de TiO₂

El protocolo de preparación de celdas presenta 4 fases:

2.5.1 Preparación de la pasta de TiO₂

Para realizar la síntesis de dióxido de titanio (TiO₂) en pasta, se usó:

- Dióxido de titanio Degussa P25
- Mortero de porcelana
- Acetil acetona
- Agua destilada
- Tritón X-100

Se agregaron 12 g de dióxido de titanio Degussa P25 en un mortero de porcelana. Luego se añadieron 0,4 ml de acetil acetona y 3,6 ml de agua destilada. Luego se mezcló mecánicamente por 5 minutos. Posteriormente se agregaron 16 ml de agua destilada lentamente con un continuo aplastamiento de la mezcla, para después añadir 0,2 ml de tritón X-100. Finalmente se puso la mezcla en una botella de 20 ml junto a un imán y se dejó agitando en un agitador magnético por 24 horas (figura 2.7) (Cerde, 2015).



Figura 2.7 Mezcla de TiO_2 agitándose en agitador magnético

2.5.2. Preparación de los vidrios

Se cortaron 20 trozos de vidrio conductor FTO (óxido de estaño dopado con flúor, por sus siglas en inglés), de 2x2 cm de tamaño, asignando dos vidrios por cada extracto, además de 2 vidrios sin extracto para establecer una medición basal. Los vidrios se limpiaron en un sonicador analógico VWR de 2,8 litros, modelo B2500E-MTH (figura 2.8) mediante un proceso de cinco pasos, con una duración de cinco minutos cada uno:

1. Limpieza con etanol.
2. Limpieza con agua y jabón.
3. Enjuague con agua desionizada.
4. Limpieza con acetona.
5. Enjuague final con agua desionizada.

Este proceso se realizó con distintos compuestos para asegurar que la suciedad o resto de material presente en el FTO sea removido sin importar su composición química.



Figura 2.8 Limpiador ultrasónico analógico VWR de 2,8 litros, modelo B2500E-MTH.

Posteriormente, se depositaron 50 μL de pasta de TiO_2 sobre cada FTO. Los vidrios recubiertos fueron colocados en una máquina de vacío marca Laurell® (figura 2.9) para distribuir homogéneamente la pasta sobre la superficie por medio de rotación acelerada. Al terminar el proceso, se sacó el vidrio y con un algodón se retiró una franja de la pasta de TiO_2 del vidrio; una franja de 2cm x 0,25 cm. (Este lugar será donde se conectarán los cables para las mediciones). El área activa corresponde a la zona con la película de TiO_2 (figura 2.10).



Figura 2.9 Recubridor por centrifugado, modelo ws-650mz-23nppb, Laurell®

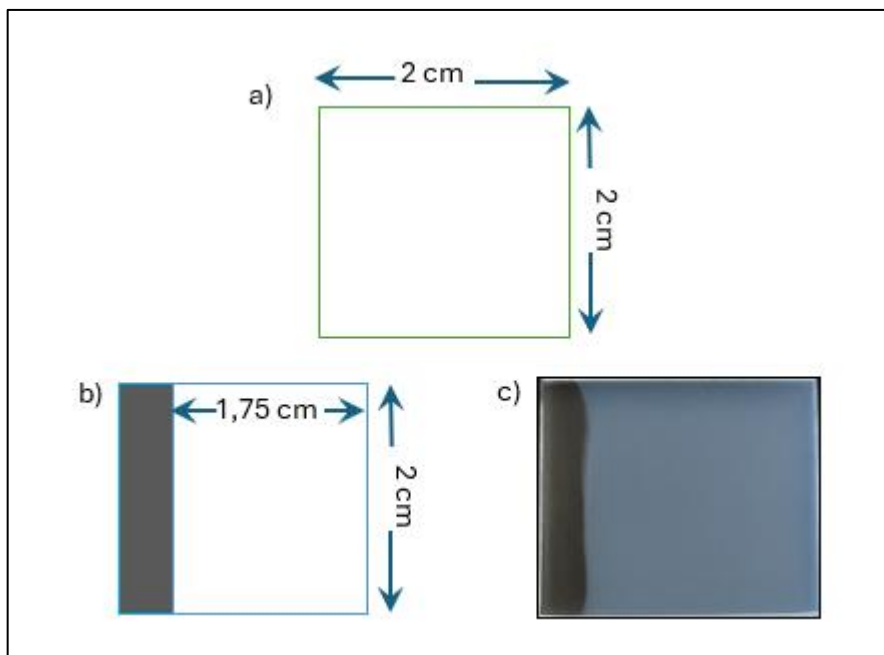


Figura 2.10 Vidrio FTO cubierto por la película de TiO_2 (a) representación esquemática de la vidrio cortado y limpiado (b) porción (blanco) recubierto con TiO_2 , (c) muestra de la placa actual preparado.

Una vez finalizado este proceso, los FTO recubiertos se transfirieron al horno tubular Model LTF 12 marca Lenton® para su cocción, en un soporte de greda (figura 2.11). El horno comenzó desde 21°C, incrementando la temperatura a razón de 1°C por minuto hasta alcanzar los 400°C, donde se mantuvo durante 30 minutos. El horneado se realizó durante toda la noche, permitiendo un enfriamiento gradual durante la madrugada.



Figura 2.11 Vidrios FTO sobre soporte de greda en disposición para ser horneados. Imagen referencial



Figura 2.12 Horno tubular Leiton®

2.5.3. Sensibilización de celdas

Los vidrios obtenidos del horno fueron depositados de a pares en placas Petri, las cuales cada una fueron llenadas con un extracto distinto hasta sumergir las celdas, en total, nueve placas Petri (tres alcoholes por tres muestras) (figura 2.13). Estas placas se taparon y sellaron con Parafilm, dejándolas sensibilizar durante 72 horas cubiertas por toallas de papel para evitar el ingreso de luz. Dos celdas fueron dejadas sin sensibilizar, ya que dichas celdas con TiO_2 y sin extractos corresponden a la medición base. (White, 2020).

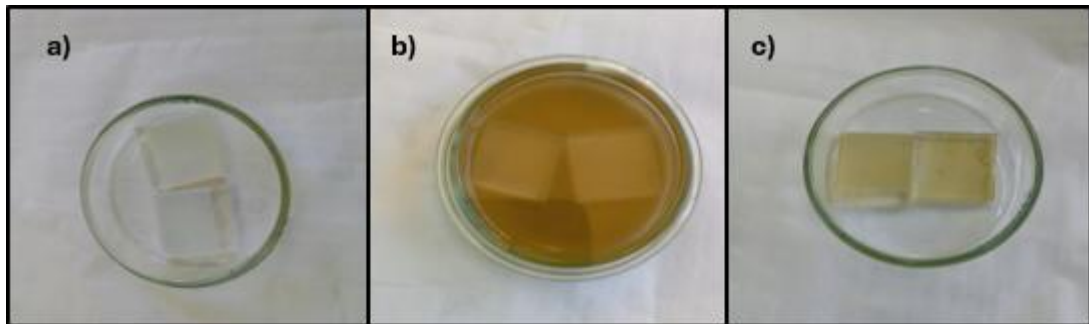


Figura 2.13 Proceso de sensibilización de DSSC con extracto de metanol de *X. parietina*. a) vidrios FTO con una película de TiO_2 . b) celdas de TiO_2 sumergidas en pigmento. c) celdas luego de 72 horas de sensibilización con el solvente evaporado.

2.5.4. Preparación del contraelectrodo

Se utilizó un vidrio con una película de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) de 2x2 cm y ácido cloroplatínico. El FTO se pasó por el mismo proceso explicado en el punto 3.5.2., donde se realizó la limpieza y luego se depositó el ácido

cloroplatínico sobre el FTO. Posteriormente fue sometido a un tratamiento térmico de 30 minutos a 450C° (Cerde 2015).

2.6 Medición de celdas

A la celda sensibilizada (72 horas en extracto) (figura 2.13) se le añadió 100 μ L de electrolito de base iodada. Luego, se unió con el contraelectrodo por la superficie conductora y se pusieron pinzas a ambos lados para sujetar la estructura de la celda, dejando un espacio al costado de cada vidrio para conectar los multímetros correspondientes, siendo los multímetros rojos al fotoelectrodo, y negros al contraelectrodo (figura 2.14 y 2.15).

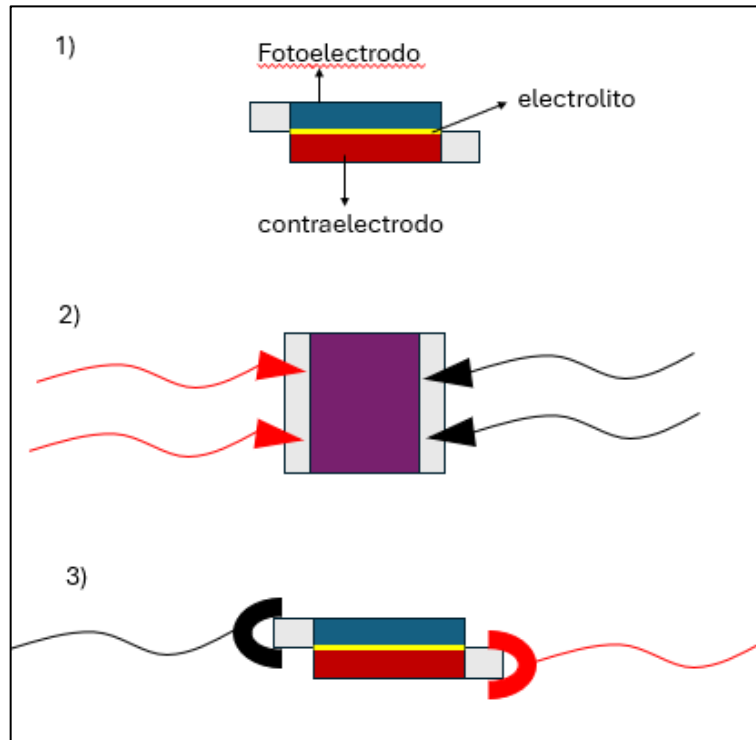


Figura 2.14 Diagramas de armados de la celda solar. 1) Paso 1. Fotoelectrodo y contraelectrodos unidos por el electrolito. 2) Paso 2. Conexión de los multímetros (cables). Vista de frente. 3) Conexión de los multímetros. Vista de lado.

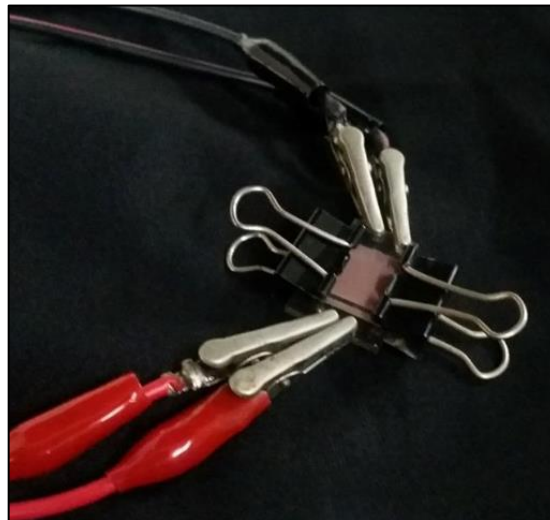


Figura 2.15 Fotografía de la celda (DSSC) armada y lista para medir. Extraída de White (2020).

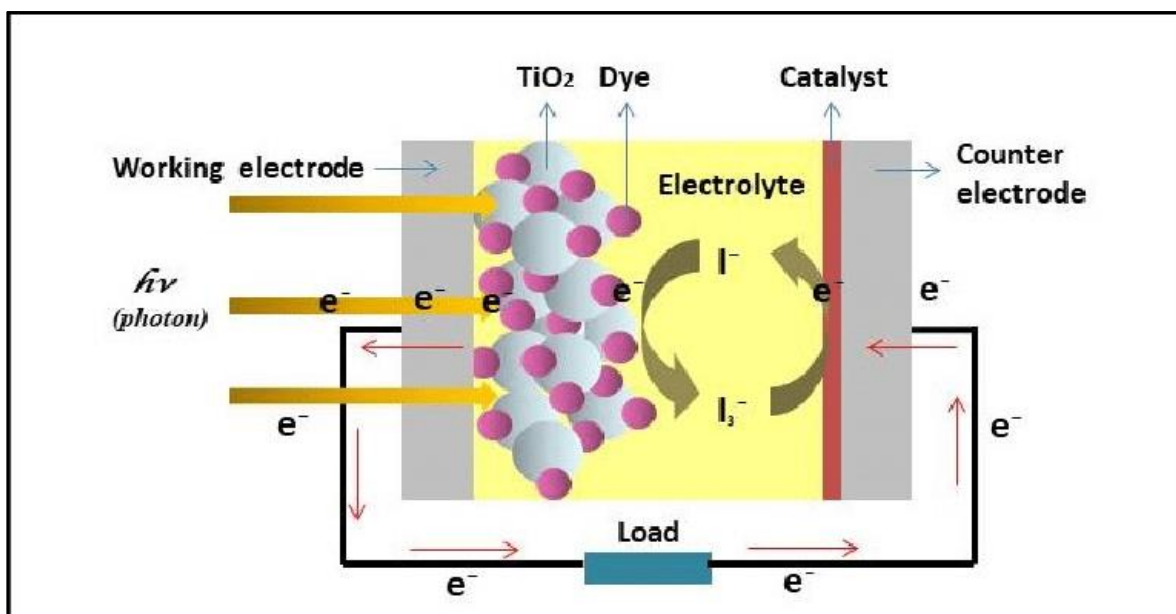


Figura 2.16 Diagrama del funcionamiento de una DSSC en base a TiO_2 y pigmento (Jamalullail et al., 2017).

Posteriormente, la celda se colocó en el simulador solar Cell Tester Modelo # CT80AAA, de Photo Emission Tech., Inc., donde fue irradiada con una lámpara de 1000 W cm^{-2} de potencia por tres segundos, tiempo estándar definido por el programa. Este proceso se repitió cinco veces por celda, considerando dos celdas por extracto, para establecer el error estadístico y calcular el promedio de las mediciones, ya que estas no son idénticas, pero sí similares.

Las primeras mediciones fueron las celdas sólo con TiO_2 , sin extracto, para establecer un baseline. Los datos obtenidos fueron procesados mediante el programa Solar Cell IV Measurement de PET (Photo Emission Tech Inc.) (margen

de error instrumental de $\pm 0,00001$), generando la curva de I-V (intensidad v/s voltaje) y los valores de eficiencia. Dentro de los valores que entrega el programa, para este trabajo, se utilizaron los siguientes:

Eficiencia de Conversión Energética (η): Porcentaje de la energía luminosa incidente que se convierte en electricidad utilizable.

Fill Factor (FF): Relación entre la potencia máxima extraída de la celda y la potencia teórica disponible, indicando la eficiencia en la conversión de energía.

Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Máximo voltaje generado por la celda cuando no fluye corriente.

Corriente de cortocircuito (I_{sc}): Máxima corriente generada por la celda cuando no hay carga conectada.

Potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$): Mayor cantidad de energía que la celda puede generar bajo condiciones óptimas de operación.

Los valores obtenidos se utilizaron para calcular la eficiencia (η) de la celda solar utilizando la fórmula:

$$\eta = P_{m\acute{a}x} \times 100 / P_{incidente}$$

Donde:

- η = Eficiencia de conversión energética (%).
- P_{max} = Potencia máxima generada por la celda ($V_{mpp} \times I_{mpp}$).
- $P_{incidente}$ = Potencia de la luz incidente sobre la celda (generalmente 1000 mW cm^{-2} bajo condiciones estándar AM1,5G).

- V_{mpp} = Voltaje en el punto de máxima potencia.
- I_{mpp} = Corriente en el punto de máxima potencia.

2.7. Análisis de datos

Para el análisis de los datos obtenidos del simulador solar “Solar Cell IV Measurement” de PET (Photo Emission Tech Inc.) y del espectrofotómetro “Jasco V-760 UV-Vis/NIR”, se utilizó el programa OriginPro 2024b (learning edition).

2.7.1 Picos de absorbancia

Los datos obtenidos del espectrofotómetro se trabajaron en el programa OriginPro, usando la herramienta “peak analyzer” para obtener los picos de absorción de cada extracto, y con ellos, por medio de una revisión bibliográfica, identificar los pigmentos y compuestos presentes en la muestra.

Por debajo de 250 nm los compuestos se clasificaron como ‘indeterminado’ debido a que varios factores dificultan la identificación de los pigmentos en el ultravioleta lejano, entre ellos, que la presencia de fotones de alta energía puede provocar fotodegradación o ruptura de enlaces. Esto se puede observar al estudiar la ecuación de energía del fotón:

$$E=h \cdot c/\lambda$$

Donde:

E: corresponde a la energía del fotón.

h: a la constante de Planck,

c: a la velocidad de la luz y

λ : a la longitud de onda.

También, al tratarse de una zona de alta energía, las moléculas pueden descomponerse o reconfigurarse, dando lugar a productos de reacción que enmascaran las estructuras originales y dificultan la asignación de picos específicos. Además, los solventes utilizados presentan una absorbancia menor a los 250 nm, por lo que también dificulta la determinación de los pigmentos presentes. (Shimadzu, 2025).

2.7.2. Datos de eficiencia

Los datos de eficiencia obtenidos del simulador solar fueron extraídos junto con el fill factor (FF), para compararlos con el baseline y entre ellos para determinar el extracto más eficiente.

2.7.3 Curva de I-V

Para la obtención de la curva I-V, los datos de voltaje (V) e intensidad (A) entregados por el simulador solar fueron trabajados en OriginPro 2024, donde los datos de intensidad de corriente fueron exportados a una nueva columna y transformados bajo la siguiente fórmula en el campo "F(x)":

$$B*1000/3.5$$

Donde:

B corresponde a la columna con datos de intensidad y 3.5 corresponde al área de la celda (si bien el FTO es de 4cm², el área con TiO₂ corresponde a 3.5cm² (Ver figura 10). El factor 1000 presente se utiliza para transformar de amperes a miliamperes (1 mA=1A×1000), esto con el fin de establecer mejor la relación de intensidad y voltaje en los gráficos finales (Cerdea 2024).


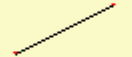
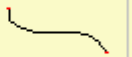
	A(X)	B(Y)	C(Y) 
Long Name	1/1/2009	00:25:34	
Units	C:\PET	IV	
Comments			
F(x)=			B*1000/3.5
Sparklines			
1	-1	0.0068	1.94229
2	-0.99195	0.00395	1.12857
3	-0.98395	0.00377	1.07771
4	-0.9759	0.00364	1.04114
5	-0.96785	0.00354	1.01029
6	-0.95985	0.00344	0.98257

Figura 2.17 Imagen del programa OriginPro 2024b, mostrando el resultado de la transformación de los datos.

2.8. Producción de nanopartículas

Las nanopartículas pueden ser formadas por metales como: oro, plata, cobre, zinc, etc. En esta investigación se utilizó sal de plata. Esto debido a la bibliografía

y procedimientos existentes ya comprobados en la formación de nanopartículas de plata en el laboratorio de termo-óptica.

2.8.1 Formación de nanopartículas

Por cada especie, se pesaron 5 gramos de material seco por especie y se mezclaron con 50 mL de agua desionizada dentro de un vaso precipitado. La mezcla se agitó magnéticamente durante tres horas a 60°C, cubierta con Parafilm (figura 2.18). El extracto se pasó por papel filtro y se almacenó en tubos Falcon. Se preparó una solución de 0,0255 g de nitrato de plata (AgNO_3) en 100 mL de agua desionizada, agitada durante 15 minutos a 60°C, según lo establecido en el protocolo. Posteriormente, se mezclaron 50 mL de agua destilada con 5 mL de extracto por vaso correspondiente y se agitaron durante 15 minutos a 60°C. Luego, se añadieron 500 μL de la solución de sal de plata y se continuó la agitación durante 20 horas a 60°C (figura 2.18) (White, 2020). El extracto resultante se pasó a un tubo Falcon y se refrigeró.

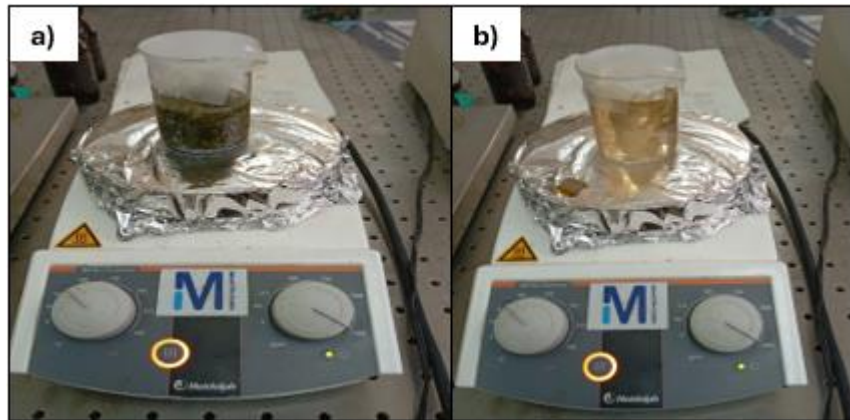


Figura 2.18 Procesos en agitador magnético. a) muestra de *X. parietina* en agua destilada. b) extracto resultante de *X. parietina* mezclada con solución de sal de plata (AgNO_3).

2.8.2 Extracción de nanopartículas

Para la extracción de las nanopartículas formadas, se llenaron 12 tubos Eppendorf con 1,5 mL del extracto con nanopartículas de plata (extracto puro). Dichos tubos pasaron por centrifugación a 10,000 revoluciones por minuto (rpm) utilizando una centrífuga Eppendorf 5452 MiniSpin® en ciclos de 15 minutos para permitir que las nanopartículas se asentaran en el fondo (figura 2.19). Después de cada ciclo, se retiró el sobrenadante, se añadió nuevamente extracto puro hasta alcanzar 1,5 mL y se repitió el proceso de centrifugación. (White, 2020). Este procedimiento se realizó tres veces, llevando a cabo la limpieza de manera independiente para cada especie. Finalmente, las nanopartículas aisladas se depositaron en una placa Petri respectivamente y se secaron en un horno a 40°C durante cinco minutos.



Figura 2.19 Centrifuga con 12 tubos Eppendorf con solución del extracto de *X. parietina* con nanopartículas.

2.8.3. Sensibilización con nanopartículas

Las nanopartículas obtenidas en las placas Petri se mezclaron con el extracto que entregó mayor eficiencia. Se recubrieron seis FTO (dos por placa Petri) con las nanopartículas y se dejaron sensibilizar durante 72 horas. (White, 2020). Finalmente, se midió la eficiencia de las celdas solares con nanopartículas utilizando el procedimiento anteriormente descrito para medir las celdas sensibilizadas en el punto 2.6, y fueron analizados como se describe anteriormente en el punto 2.7.2 al punto 2.7.4.

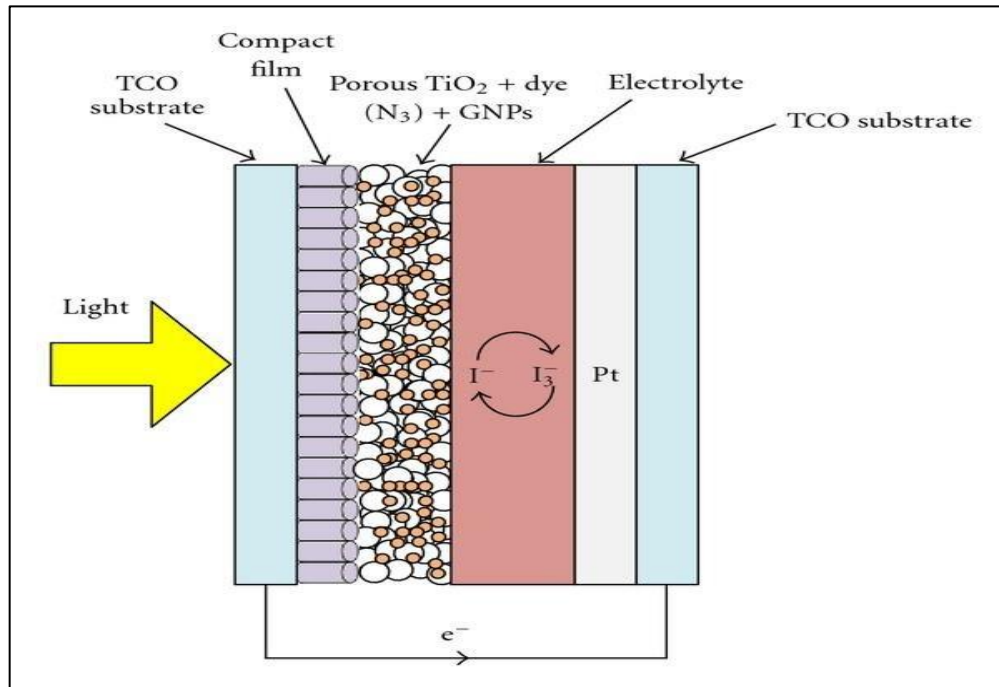


Figura 2.20 Esquema de la estructura de una DSSC en base a TiO₂ + pigmentos, con nanopartículas de oro integradas (GNPs) (Chen, Chen, & Tseng, 2010).

III. RESULTADOS

3.1. Caracterización espectrofotométrica de los extractos en distintos alcoholes.

Los espectros de absorción UV-Vis obtenidos para *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum* y *Xanthoria parietina* muestran diferencias significativas en la intensidad y el perfil de absorción dependiendo del solvente de extracción (figura 3.1). En general, las curvas de absorción indican que el metanol fue el solvente que permitió obtener la mayor intensidad de absorbancia en los tres organismos, alcanzando valores superiores a 4,5 unidades de absorbancia (u.a.) en *Pleurotus ostreatus* y *Xanthoria parietina*, y alrededor de 3,5 u.a. en *Stereum hirsutum*. El etanol presentó un comportamiento similar, pero con valores de absorbancia ligeramente menores, mientras que el hexano mostró las absorbancias más bajas en todos los casos, reflejando una menor extracción de compuestos absorbentes en el rango UV-Vis.

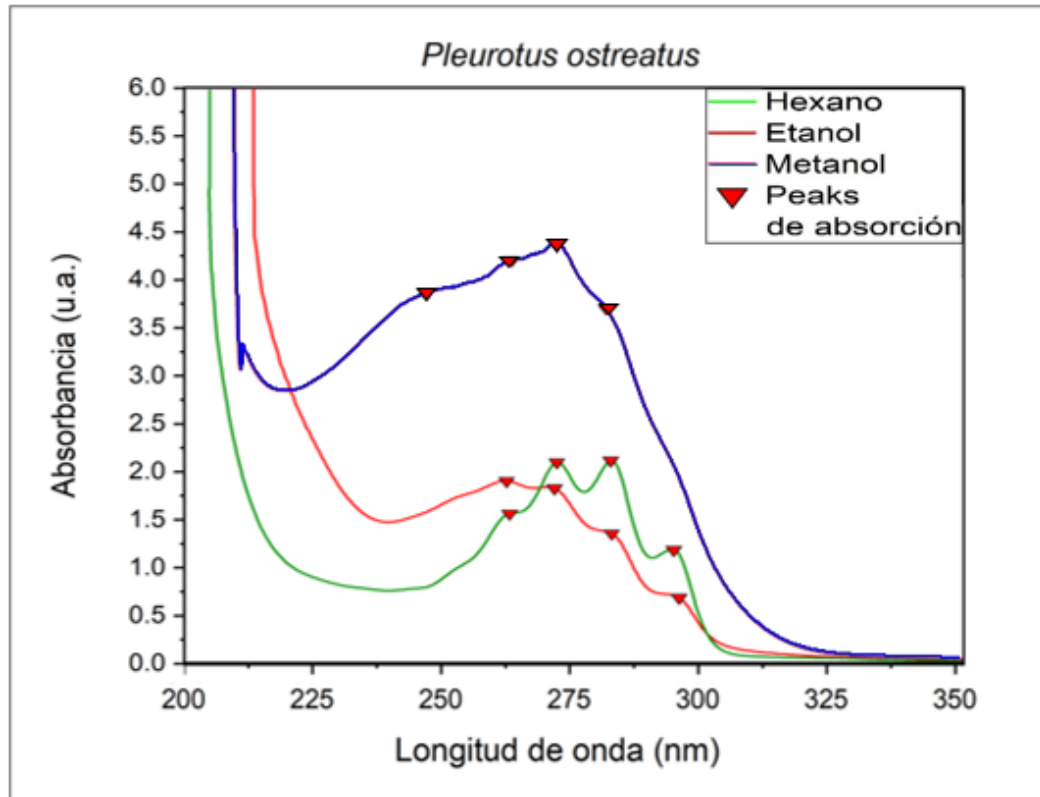


Figura 3.1 Gráfico de absorción en el rango UV-vis (200-350 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de *P. ostreatus*, macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.

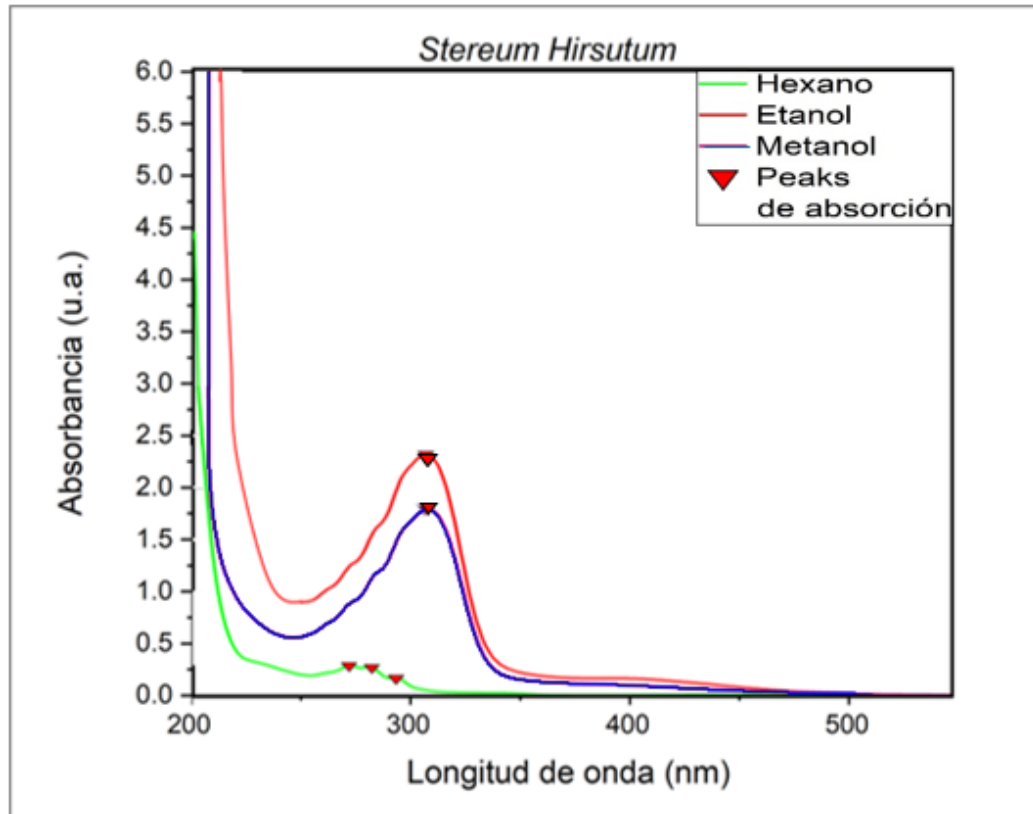


Figura 3.2 Gráfico de absorbancia en el rango UV-vis (200-500 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de *S. hirsutum*, macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.

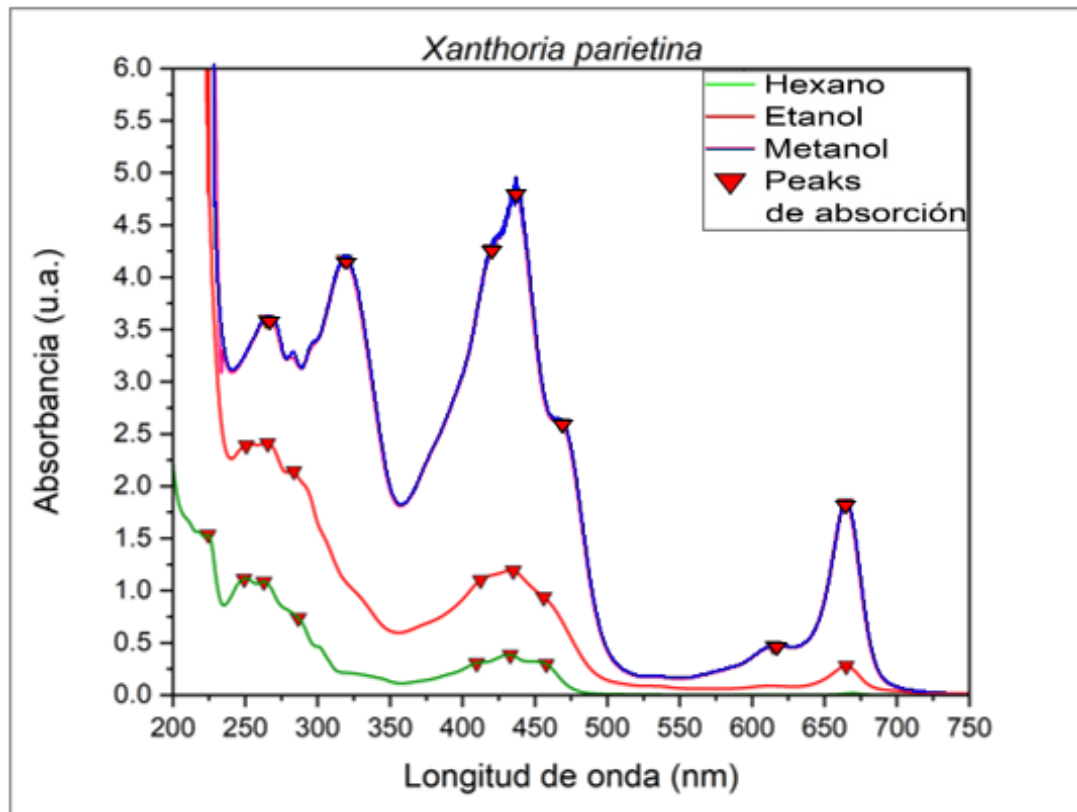


Figura 3.3 Gráfico de absorción en el rango UV-vis (200-750 nm) indicando los respectivos picos (peaks) de absorción de los pigmentos presentes en los extractos de *X. parietina*, macerado en etanol, metanol y hexano, respectivamente.

3.2 Identificación de pigmentos asociados a las longitudes de onda

Con los picos de absorción identificados, se procedió a realizar una revisión bibliográfica para la identificación de los pigmentos asociados a las distintas longitudes de onda.

a. Pleurotus ostreatus

Los espectros de absorción de *Pleurotus ostreatus* revelaron picos característicos en 262 nm y 271 nm, asociados con la presencia de ácido protocatecuico y ácido gálico, respectivamente (Chen & Feng, 2011; Mansuri & Desai, 2019). En 282 nm, se identificaron precursores de melanina, como L-DOPA y DHI, mientras que en 294 nm se observaron señales atribuibles a melanina o sus derivados (Zhang et al., 2022). La extracción de estos compuestos fue favorecida principalmente por metanol y hexano, aunque el etanol también permitió detectar precursores de melanina a 282 nm (Tesoro et al., 2022).

b. Stereum hirsutum

El espectro de absorción de *Stereum hirsutum* mostró una señal destacada en 307 nm, correspondiente a compuestos fenólicos (Cerovic et al., 2002), especialmente en extracciones con etanol y metanol. Al igual que en *P. ostreatus*, se registraron picos en 271 nm y 294 nm, indicativos de ácido gálico y melanina, respectivamente (Mansuri & Desai, 2019; Zhang et al., 2022). Además, la absorción en 282 nm confirmó la presencia de precursores de melanina (Tesoro et al., 2022).

c. Xanthoria parietina

Xanthoria parietina presentó un espectro de absorción más amplio y complejo, con picos desde 250 nm hasta 664 nm, lo que indica la presencia de metabolitos

antraquinónicos y clorofilas. La parietina, pigmento característico de este líquen, se identificó en la región de 265 a 285 nm, con un pico prominente a 283 nm (Manojlovic et al., 2010; Lorenz et al., 2024). En la región visible, la absorción en 412 nm y 664 nm se asoció con clorofila a, mientras que los picos en 456 nm, 468 nm y 615 nm se atribuyeron a clorofila b (Whitmarsh, 1995). Además, las señales en 430 nm y 435-436.8 nm reflejaron una superposición entre parietina y compuestos clorofílicos. Etanol y metanol facilitaron la extracción de parietina y clorofilas, mientras que hexano permitió detectar parietina a 430 nm y compuestos fenólicos en torno a 300 nm.

Los compuestos fenólicos y melaninas absorbieron predominantemente en la región ultravioleta (262–307 nm), lo que podría contribuir a una mayor recolección de fotones de alta energía. En el caso de *X. parietina*, la combinación de parietina y clorofilas permitió una absorción extendida hasta 664 nm, favoreciendo una captura lumínica más amplia. En términos de extracción, etanol y metanol resultaron eficaces para obtener compuestos polares, como ácidos fenólicos y precursores de melanina, mientras que hexano facilitó la extracción de pigmentos lipofílicos como la parietina. La selección del solvente juega un papel clave en la optimización del perfil de compuestos extraídos, influyendo en el rendimiento fotovoltaico de cada especie en dispositivos DSSC.

Tabla 3.1 Identificación de los pigmentos asociados a los picos detectados en las curvas de absorbancia UV-vis obtenidos de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, en etanol, metanol y hexano. En el rango de 250 al 750 nm.

	λ (nm)	Pigmento asociado	Solvente de extracción	Revisión bibliográfica
<i>Pleurotus ostreatus</i>	262	Ácido protocatecuico	Etanol y hexano	(Chen & Feng, 2011)
	271	Ácido gálico	Etanol y hexano	(Mansuri & Desai, 2019)
	282	Precursores de melanina (L-DOPA, DHI)	Etanol, metanol y hexano	(Tesoro <i>et al.</i> 2022)
	294	Melanina o derivados de melanina	Etanol y hexano	(Zhang <i>et al.</i> 2022)
<i>Stereum hirsutum</i>	307	Compuestos fenólicos varios	Etanol y metanol	(Cerovic <i>et al.</i> 2002)
	271	Ácido gálico	Etanol y hexano	(Mansuri & Desai, 2019)
	282	Precursores de melanina (L-DOPA, DHI)	Hexano	(Tesoro <i>et al.</i> 2022)
	294	Melanina o derivados de melanina	Hexano	(Zhang <i>et al.</i> 2022)
<i>Xanthoria parietina</i>	250	Indeterminado	Etanol y hexano	(ver punto 2.7.1, párrafo 2)
	265-285	Parietina	Etanol y metanol	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024)
	283	Parietina	Etanol	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024)
	300	Compuestos fenólicos varios	Hexano	(Cerovic <i>et al.</i> 2002)
	318.6	Compuestos fenólicos varios	Metanol	(Cerovic <i>et al.</i> 2002)
	412	Clorofila a	Etanol	(Whitmarsh J. 1995)
	430	Parietina	Hexano	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024)
	435-436.8	Parietina y/o clorofila	Etanol y metanol	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024)
	456	Parietina, Clorofila b	Etanol	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024); (Whitmarsh J. 1995)
	468	Parietina, Clorofila b	Metanol	(Manojlovic <i>et al.</i> 2010); (Lorenz <i>et al.</i> 2024); (Whitmarsh J. 1995)
	615	Clorofila b	Metanol	(Whitmarsh J. 1995)
664	Clorofila a	Etanol y metanol	(Whitmarsh J. 1995)	

* Las longitudes de onda no se repiten en la tabla, por lo que algunas que están presentes en los gráficos pueden no estar incluidas para ciertas especies en dicha tabla.

3.3. Eficiencia y *Fill Factor* (FF) de las DSSC

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.2 muestran la eficiencia de conversión de energía y el *Fill Factor* (FF) de las celdas solares sensibilizadas con pigmentos extraídos de *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum* y *Xanthoria parietina* utilizando distintos solventes (etanol, metanol y hexano).

3.3.1 Análisis de la eficiencia de conversión energética

La eficiencia de conversión de las celdas sensibilizadas varió significativamente dependiendo tanto de la especie utilizada como del solvente de extracción. La celda base sin extracto presentó una eficiencia del 0,019%, sirviendo como referencia para evaluar el efecto de los extractos naturales (Tabla 3.2).

Entre los extractos evaluados, *Xanthoria parietina* en metanol presentó la mayor eficiencia (0,047%), lo que sugiere que los pigmentos extraídos lograron una excitación más intensa al absorber la radiación incidente, generando electrones en estado excitado con suficiente energía para superar la barrera energética entre el colorante y la banda de conducción del TiO_2 ; además, la polaridad del metanol pudo favorecer la estabilidad y disponibilidad de estos compuestos fotoactivos en la interfase, lo que resultó en que los pigmentos extraídos en este disolvente lograron una transferencia de electrones más eficiente al semiconductor.

Stereum hirsutum mostró valores intermedios de eficiencia, alcanzando 0,032% en metanol y 0,030% en etanol, lo que confirma que los metabolitos presentes en esta especie pueden actuar como sensibilizadores efectivos, aunque con menor rendimiento que *Xanthoria parietina*. Por otro lado, *Pleurotus ostreatus* presentó las menores eficiencias (0,013% – 0,027%), lo que indica una menor capacidad de sensibilización de sus pigmentos, posiblemente debido a su menor solubilidad en los disolventes utilizados o a una absorción de luz menos eficiente. En cuanto a la influencia del solvente, los extractos en metanol y etanol mostraron mejores resultados en comparación con hexano. Todas las muestras extraídas con hexano presentaron eficiencias significativamente más bajas ($\leq 0,013\%$), lo que sugiere que los compuestos lipofílicos extraídos con este solvente no favorecen la inyección de electrones al semiconductor. Además, se observa que los valores de Fill Factor (FF) también son más bajos en estos casos, lo que indica una menor estabilidad y aprovechamiento de la potencia generada por la celda.

3.3.2. Análisis del Fill Factor (FF)

El Fill Factor (FF) indica la calidad de la celda solar y su capacidad para entregar potencia a la carga externa. Un FF más alto sugiere menor resistencia interna y una mejor estabilidad en la curva I-V.

Xanthoria parietina en metanol mostró el mayor FF (0,59957), lo que indica que, además de tener la mayor eficiencia, su curva I-V es más "cuadrada",

optimizando la extracción de carga. *Stereum hirsutum* en etanol y metanol también presentó FF altos (0,59628 y 0,54901, respectivamente), reflejando una buena capacidad de conversión de potencia. *Pleurotus ostreatus* en metanol obtuvo un FF de 0,53357, siendo la mejor condición para esta especie, aunque con una eficiencia de conversión menor. Las extracciones con hexano mostraron los valores de FF más bajos en todas las especies ($\leq 0,4096$), reflejando problemas en la estabilidad de la curva I-V y mayor resistencia interna, lo que impide una conversión eficiente de energía.

Tabla 3.2 Datos de conversión energética (Eficiencia, Jsc, Voc y FF) obtenidos de las mediciones de las DSSC en base de TiO₂ con pigmento de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente, extraídos en etanol, metanol y hexano. Con una irradiancia de 1000 W cm⁻²

	Eficiencia (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (Volts)	Fil Factor (FF)
Celdabase de TiO ₂	0,019	0,09	0,45	0,49
<i>P.ostreatus</i> - Etanol	0,027	0,10	0,52	0,52
<i>P.ostreatus</i> - Metanol	0,023	0,09	0,51	0,53
<i>P.ostreatus</i> - Hexano	0,013	0,07	0,45	0,41
<i>S. hirsutum</i> - Etanol	0,03	0,11	0,47	0,60
<i>S. hirsutum</i> - Metanol	0,032	0,12	0,50	0,55
<i>S. hirsutum</i> - Hexano	0,006	0,02	0,44	0,50
<i>X. parietina</i> -Etanol	0,031	0,11	0,49	0,56
<i>X. parietina</i> - Metanol	0,047	0,15	0,52	0,60
<i>X. parietina</i> - Hexano	0.001	0.01	0.35	0.31

3.3.3. Análisis de las curvas corriente-voltaje (Gráficos I-V)

Los gráficos de corriente-voltaje reflejan el comportamiento de cada celda sensibilizada bajo iluminación, permitiendo evaluar su eficiencia en la conversión de energía. En general, las celdas sensibilizadas con metanol y etanol presentan una mayor densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), lo que sugiere una mejor inyección de electrones hacia el TiO_2 .

- Etanol: La celda sensibilizada con *S. hirsutum* mostró la mayor intensidad de corriente en la curva I-V, lo que coincide con su mayor Fill Factor (0,59628). *P. ostreatus* presentó una menor corriente en comparación con las otras especies, reflejando su baja eficiencia de conversión (Figura 3.5).
- Metanol: *X. parietina* destacó por alcanzar la mayor corriente de cortocircuito y el mayor voltaje de circuito abierto (V_{oc}), lo que se correlaciona con su eficiencia máxima en la tabla. *S. hirsutum* también presentó una buena respuesta, mientras que *P. ostreatus* se mantiene en valores menores (Figura 3.7).
- Hexano: Las curvas muestran las menores intensidades de corriente, confirmando los bajos valores de eficiencia observados en la tabla. *X. parietina* con hexano presentó la menor eficiencia general (0,001%), con una curva prácticamente plana y baja respuesta fotoeléctrica (Figura 3.6).

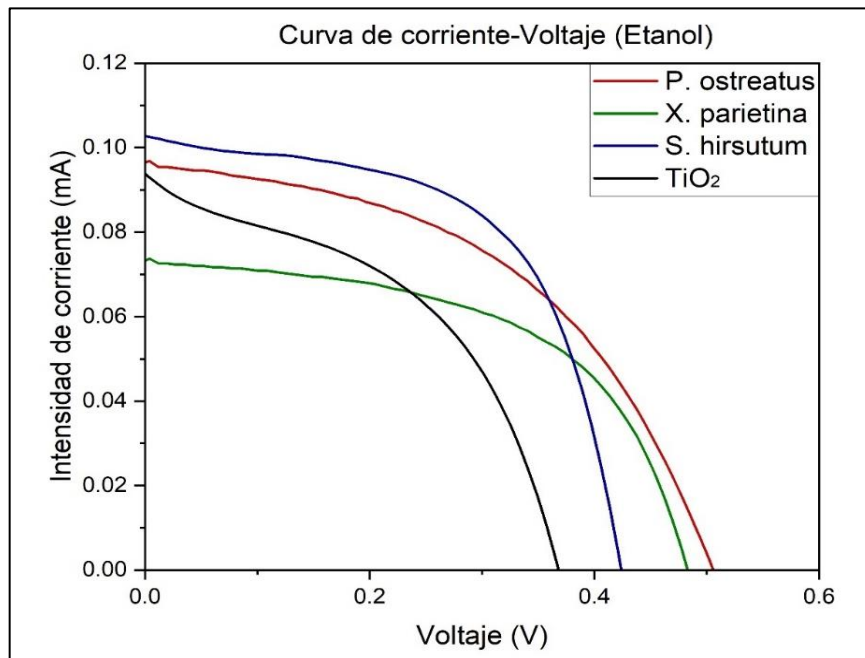


Figura 3.4 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO₂ y pigmentos de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente, extraídos en etanol. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm⁻².

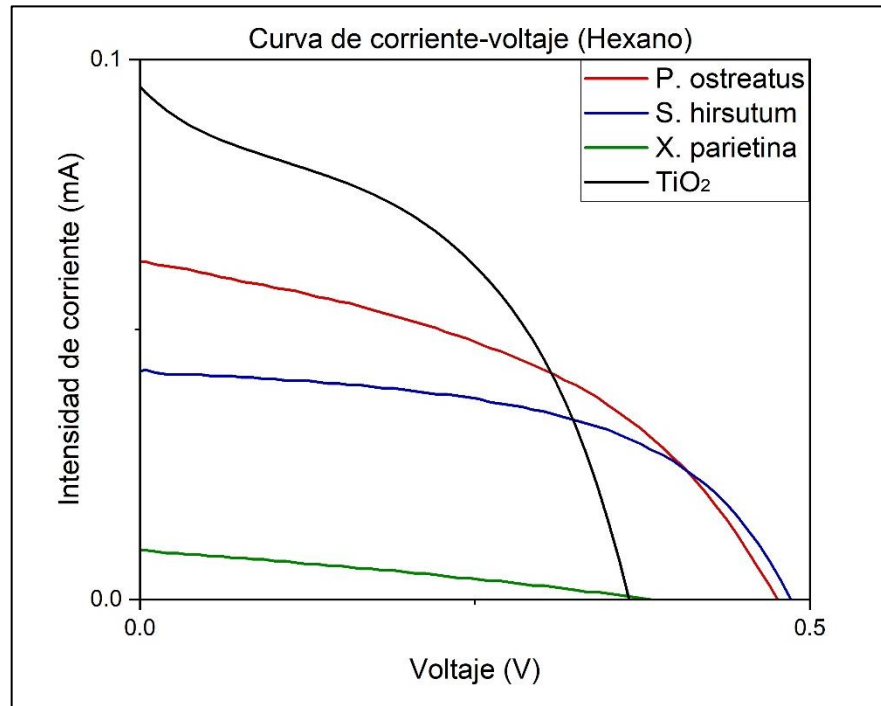


Figura 3.5 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO₂ y pigmentos de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente, extraídos en hexano. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm⁻².

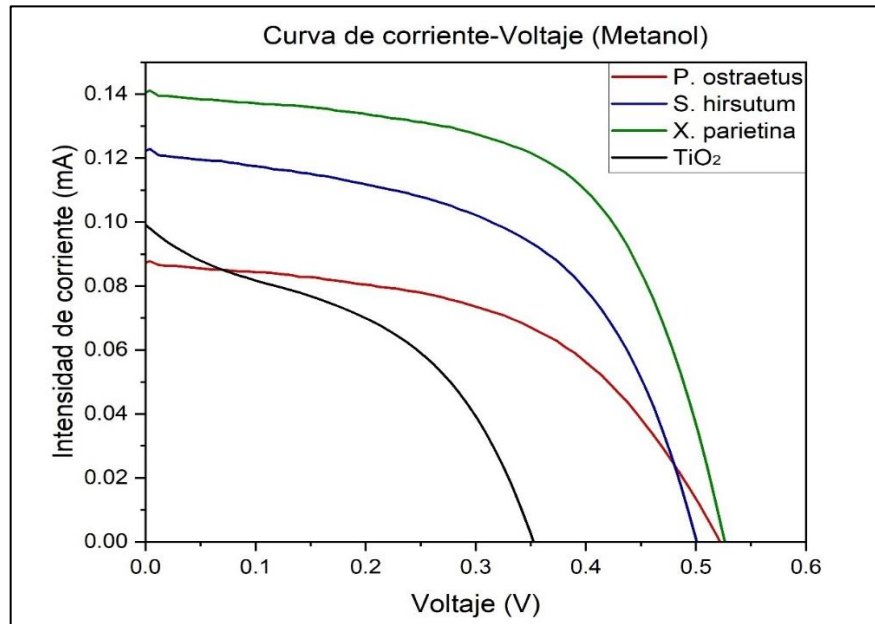


Figura 3.6 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO₂ y pigmentos de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente, extraídos en metanol. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm⁻².

3.4. Eficiencia de DSSC con nanopartículas

Se evaluó el impacto de la incorporación de nanopartículas en celdas sensibilizadas con *Xanthoria parietina* en metanol, que previamente había mostrado la mayor eficiencia entre los extractos estudiados. Los valores de eficiencia y Fill Factor (FF) obtenidos muestran variaciones en el desempeño de las celdas según el tipo de nanopartícula utilizada (Tabla 3.3).

La celda base de TiO₂ sin pigmento presentó una eficiencia del 0,0198%, que sirve como referencia para evaluar los efectos de la adición de nanopartículas.

La combinación con nanopartículas derivadas de *X. parietina* mostró la mayor eficiencia (0,0372%), superando la celda base y las sensibilizadas con nanopartículas de *P. ostreatus* y *S. hirsutum*. Esto sugiere que la compatibilidad química entre el pigmento y sus propias nanopartículas puede haber favorecido la transferencia de carga y la estabilidad del sistema (Tabla 3.3).

Por otro lado, las nanopartículas obtenidas a partir de *P. ostreatus* y *S. hirsutum* no lograron mejorar la eficiencia de la celda base, mostrando valores de 0,0172% y 0,0222%, respectivamente. Además, en todas las muestras, el Fill Factor se redujo en comparación con la celda base sin nanopartículas. El FF más bajo se observó en la celda con nanopartículas de *P. ostreatus* (0,3581), lo que indica una mayor resistencia interna y una menor estabilidad en la conversión de energía.

Estos resultados sugieren que, si bien la introducción de nanopartículas puede influir en la eficiencia fotovoltaica, su efecto depende en gran medida de la compatibilidad del material con el pigmento sensibilizador.

Tabla 3.3 Datos de conversión energética (Eficiencia, J_{sc} , V_{oc} y FF) obtenidos de las mediciones de las DSSC en base de TiO_2 con pigmento de *X. parietina* extraído en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, con una irradiancia de 1000 W cm^{-2}

Muestra	Eficiencia (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (Volts)	Fill Factor (FF)
TiO_2	0,0198	0,09	0,48	0,4872
<i>P. ostreatus</i>	0,0172	0,09	0,32	0,3581
<i>S. hirsutum</i>	0,0222	0,11	0,43	0,3849
<i>X. parietina</i>	0,0372	0,16	0,52	0,4573

Las curvas de corriente-voltaje reflejan el impacto de la adición de nanopartículas en la respuesta fotoeléctrica de las celdas sensibilizadas con *X. parietina* en metanol. Se observa que la intensidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) se incrementa en todas las celdas con nanopartículas en comparación con la celda base de TiO_2 , lo que sugiere una mayor captación de luz y generación de electrones.

Entre las celdas sensibilizadas, la mayor corriente de cortocircuito se registra en la muestra con nanopartículas de *S. hirsutum*, seguida de cerca por las de *P. ostreatus* y *X. parietina*. Sin embargo, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la forma de la curva indican que la celda con nanopartículas de *X. parietina* mantiene un mejor equilibrio en la extracción de carga, lo que coincide con su mayor eficiencia en la tabla de resultados (Tabla 3.3).

En contraste, la celda con nanopartículas de *P. ostreatus* presenta una curva menos pronunciada y un menor V_{oc} , lo que sugiere una menor capacidad para generar y mantener el flujo de electrones. Esto se refleja en su bajo Fill Factor en la tabla. La menor pendiente de caída en la curva de la celda con nanopartículas de *S. hirsutum* indica una mayor pérdida de energía, posiblemente debido a recombinaciones no deseadas.

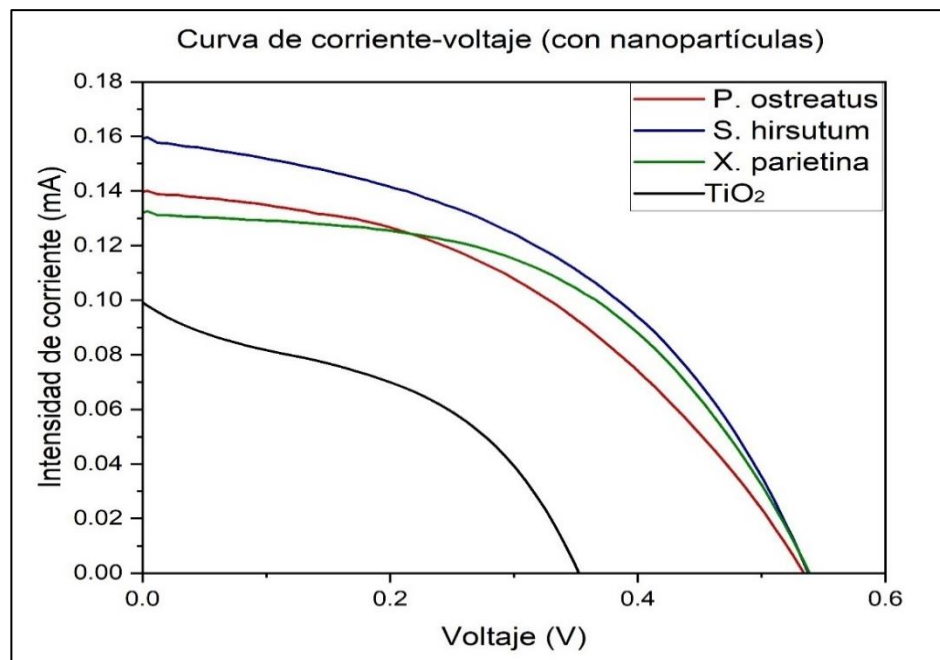


Figura 3.7 Curva corriente-voltaje (I-V) obtenida de las mediciones de las DSSC con base de TiO₂ y extracto de *X. parietina* macerado en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente. Las mediciones se realizaron bajo una irradiancia de 1000 W cm⁻².

IV. DISCUSIÓN

El desarrollo de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) utilizando pigmentos naturales representa un avance en la investigación de tecnologías fotovoltaicas sostenibles. En este estudio, se evaluó la eficiencia de extractos de *Pleurotus ostreatus*, *Stereum hirsutum* y *Xanthoria parietina* en diferentes disolventes, así como el efecto de nanopartículas metálicas en la mejora del rendimiento de las DSSC.

4.1 Comparación con estudios previos sobre DSSC con pigmentos naturales

Los resultados obtenidos muestran que *Xanthoria parietina* en metanol fue la condición más eficiente, alcanzando una eficiencia de conversión del 0,047%. Estudios previos han reportado eficiencias variables según el tipo de pigmento y el solvente utilizado. Por ejemplo, en un estudio donde se emplearon pigmentos carotenoides naturales, se logró una eficiencia de 0,23% cuando se usó etanol como solvente (White, 2020). A pesar de que esta eficiencia es superior a la de los extractos estudiados aquí, los valores obtenidos en este trabajo son comparables con otros estudios de DSSC con pigmentos naturales, donde se reportan eficiencias en el rango de 0,01-0,05% (Cerdeira 2024).

4.2 Incorporación de nanopartículas y su efecto en la eficiencia fotovoltaica

La incorporación de nanopartículas metálicas a DSSC se ha explorado como una estrategia para mejorar la eficiencia de conversión. En este estudio, la adición de nanopartículas derivadas de *X. parietina*, *P. ostreatus* y *S. hirsutum* resultó en una eficiencia máxima de 0,0372%, inferior a la celda sin nanopartículas (0,047%) pero superior a la celda base con TiO₂ sin pigmento (0,019%).

Estudios previos han demostrado que la incorporación de nanopartículas de plata en DSSC puede mejorar la eficiencia en un 6%, incrementando la absorción de luz y la transferencia de carga debido a efectos de resonancia de plasmones superficiales (Danladi *et al.*, 2016). Sin embargo, la concentración de nanopartículas es un factor crítico; concentraciones superiores al 5% pueden generar agregación y pérdida de eficiencia debido a recombinaciones electrón-hueco (Putri *et al.*, 2025). En este trabajo, la reducción de eficiencia en presencia de nanopartículas sugiere que la interacción con el pigmento puede no ser completamente sinérgica o que la dispersión de nanopartículas no fue óptima, como se ha observado en otros sistemas similares (Parveen *et al.* 2024).

4.3 Impacto del solvente y la selección de pigmentos

La selección del disolvente de extracción es un parámetro determinante en el rendimiento de las DSSC. En este estudio, se observó que los solventes polares

(etanol y metanol) facilitaron la extracción de compuestos fenólicos y melaninas, mientras que el hexano permitió la extracción de parietina. El uso de metanol proporcionó mejores resultados que el etanol y hexano, lo que concuerda con investigaciones previas donde los disolventes polares han mostrado una mejor extracción de compuestos activos como fenoles y flavonoides, y donde la extracción selectiva de pigmentos ha demostrado mejorar la eficiencia de conversión al aprovechar las diferencias en sus propiedades de absorción y transferencia de carga (White, 2020; Alamu et al., 2024).

4.4. Eficiencia de *Xanthoria parietina*

La mayor conducción de energía luminosa en *Xanthoria parietina* se debe a la sinergia entre su corteza que guía la luz y, por otro lado, a la parietina.

La corteza desvía los fotones hacia la zona fotobionte, mientras la parietina absorbe radiación UV-azul y reemite fluorescencia verde-naranja, solapándose con las bandas de absorción de clorofilas y carotenoides y favoreciendo así la rápida transferencia de energía (Artetxe U. *et al.* 2018). Además, líquenes de corteza clara presentan un NPQ que se activa y se relaja en segundos. Esta disipación breve evita daños sin reducir la captación neta de CO₂, lo que incrementa la fracción de luz convertida en reacciones fotoquímicas productivas (Solhaug, K. A. *et al.* 2020). Por el contrario, los hongos no liquenizados dependen casi exclusivamente de eumelanina, un pigmento de banda ancha que

absorbe todo el espectro, pero convierte la energía principalmente en calor, mantiene el NPQ activo durante más tiempo y restringe la energía útil para procesos redox, lo que explica su menor rendimiento en las DSSC (Beckett *et al.* 2019).

En el líquen, la arquitectura talina y los pigmentos selectivos son atributos para optimizar la función del fotobionte y protegerlo al mismo tiempo contra radiación dañina. En combinación confieren al líquen una eficiencia fotofísica superior que en caso de los hongos no liquenizados, justificando por qué los extractos de *X. parietina* superan a los de *P. ostreatus* y *S. hirsutum* en la conversión fotovoltaica de las celdas DSSC.

4.5 Implicaciones y direcciones futuras

Los resultados obtenidos confirman el potencial de los hongos y líquenes como fuentes de pigmentos naturales para DSSC, aunque la eficiencia de conversión sigue siendo baja en comparación con los sensibilizadores sintéticos. Investigaciones futuras podrían centrarse en mejorar la estabilidad térmica y química de los pigmentos, optimizar la dispersión de nanopartículas y explorar la combinación de pigmentos naturales con estructuras híbridas para aumentar la captación de luz y la transferencia de electrones (Parveen *et al.*, 2024; Alamu *et al.*, 2024). La aplicación de metodologías de síntesis verde también podría permitir la fabricación de DSSC más sostenibles y ambientalmente amigables.

En conjunto, esta investigación contribuye a la comprensión de los pigmentos naturales en DSSC y proporciona un marco para futuros estudios en la optimización de su rendimiento fotovoltaico.

V. CONCLUSIÓN

Esta tesis demuestra la viabilidad de emplear extractos fúngicos y liquénicos, en particular *Xanthoria parietina*, como sensibilizadores naturales en celdas solares DSSC. La eficiencia de conversión varió según la especie y el disolvente utilizado, alcanzando un máximo de 0,047% con *X. parietina* en metanol. La polaridad del solvente influyó en la extracción de compuestos fotoactivos, siendo el etanol y metanol más eficaces que el hexano. La incorporación de nanopartículas de plata, aunque con efectos limitados en la eficiencia, abre posibilidades de optimización para mejorar la absorción de luz y la transferencia de carga.

Estos hallazgos refuerzan el potencial de los pigmentos naturales en la tecnología fotovoltaica, alineándose con estrategias de sostenibilidad. Para su aplicación a gran escala, se requiere optimizar la estabilidad de los pigmentos, mejorar los procesos de extracción y explorar combinaciones con materiales avanzados. Con ello, se fortalece el vínculo entre la biotecnología y la energía renovable, impulsando el desarrollo de celdas solares más ecológicas y eficientes.

VI. GLOSARIO

Arquitectura talina: Organización estructural del talo (cuerpo) del líquen. Esta estructura incluye capas funcionales como la corteza (protección), la capa algal o fotobionte (fotosíntesis), la médula (soporte y almacenamiento) y, en algunos casos, una corteza inferior.

Contraelectrodo: También llamado electrodo auxiliar, es el electrodo empleado para cerrar el circuito electroquímico y permitir el flujo de corriente, complementando la función del electrodo de trabajo.

Corriente de Cortocircuito (I_{sc}): La corriente máxima que fluye por la celda cuando los terminales están conectados directamente (resistencia nula). Es un indicador de la capacidad de generación de cargas bajo iluminación.

Corteza ópticamente activa / guía de luz: Parte externa del líquen que no solo protege, sino que también actúa como una guía óptica natural, redirigiendo la luz hacia el interior del talo, donde se encuentra el fotobionte.

Densidad de Corriente de Cortocircuito (J_{sc}): Cociente entre la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y el área activa de la celda. Se expresa típicamente en mA/cm². Permite comparar celdas de diferentes tamaños, representando la generación de fotocorriente por unidad de superficie.

DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells): Celdas solares sensibilizadas por colorante, en las cuales un pigmento u otro sensibilizador absorbe luz y transfiere electrones a un semiconductor (típicamente TiO_2). Constituyen una alternativa a las celdas de silicio, destacándose por su sencillez de fabricación y potencial costo reducido.

Eficiencia de Conversión Energética (η): Porcentaje de la potencia luminosa incidente que se convierte en electricidad. Se calcula relacionando la potencia de salida en el punto de máxima potencia (P_{max}) con la potencia de entrada (P_{in} incidente).

Electrodo: Conductor (usualmente metálico) que permite el paso de corriente eléctrica hacia o desde un medio, posibilitando reacciones electroquímicas en su superficie.

Electrolito de Base Iodada: Solución que facilita el transporte de cargas en la celda (normalmente yodo/triyoduro, I^-/I_3^-). Regenera el colorante oxidado después de la transferencia de electrones, completando el ciclo de reacción en la DSSC.

Eumelanina: Tipo de melanina fúngica de color oscuro que absorbe luz en un rango amplio (UV-IR), pero que disipa la energía principalmente como calor. Se encuentra comúnmente en hongos no liquenizados.

Fill Factor (FF): Relación entre la potencia máxima real de la celda (punto de operación óptimo) y la potencia teórica ($V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}}$). Un FF elevado señala menores pérdidas internas y un mejor aprovechamiento de la curva I-V.

Fotobionte: Componente fotosintético del líquen (alga verde o cianobacteria), que capta luz y convierte el CO_2 en azúcares. Vive en simbiosis con el micobionte (el hongo).

FTO: Sustrato de vidrio con un recubrimiento conductor de óxido de estaño dopado con flúor (Fluorine-doped Tin Oxide). Actúa como electrodo transparente en DSSC y otras aplicaciones fotovoltaicas.

Melaninas: Pigmentos oscuros derivados de la oxidación de aminoácidos como la L-DOPA. Son comunes en hongos y otros seres vivos, absorbiendo fuertemente en UV y aportando protección lumínica.

Nanopartícula: Pequeña partícula sólida cuya dimensión característica se encuentra en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm). Debido a su reducido tamaño, las nanopartículas exhiben propiedades fisicoquímicas únicas (por ejemplo, alta relación superficie-volumen y efectos cuánticos) que difieren de las de materiales de mayor escala.

Nanopartículas de Plata (AgNPs): Partículas metálicas de plata (usualmente de 1–100 nm) que pueden intensificar la absorción de luz mediante plasmones superficiales, potencialmente elevando la generación de portadores de carga. Su efectividad depende de la compatibilidad con el pigmento y el semiconductor.

NPQ (apagamiento no fotoquímico): Mecanismo de disipación de energía excesiva como calor en organismos fotosintéticos. Protege a las células del daño por exceso de luz.

Parietina: Pigmento antraquinónico característico de algunos líquenes como *Xanthoria parietina*. Absorbe en el rango UV-Vis y puede actuar como fotosensibilizador en DSSC, contribuyendo a la inyección de electrones.

Pigmentos Fúngicos: Compuestos coloreados producidos por hongos, derivados de rutas metabólicas secundarias (por ejemplo, melaninas, antraquinonas, fenoles). Muchos presentan propiedades ópticas y químicas adecuadas para absorber y transferir energía lumínica.

Pigmentos Liquénicos: Metabolitos presentes en líquenes, habitualmente antraquinonas (como la parietina) o depsidonas, responsables de sus colores. Pueden poseer una fuerte absorción en el rango UV-Vis, lo que los hace potencialmente útiles como fotosensibilizadores.

Plasmón: Oscilación colectiva de los electrones de conducción en la superficie de una nanopartícula metálica cuando es excitada por radiación electromagnética. Este fenómeno, conocido como resonancia de plasmones de superficie localizada (LSPR, por sus siglas en inglés), es altamente dependiente del tamaño, forma y material de la nanopartícula, así como del medio circundante.

Polaridad de Solventes: Propiedad que describe la capacidad de un disolvente para disolver compuestos con diferentes grupos funcionales. Solventes polares (p. ej. etanol, metanol) extraen compuestos hidrófilos (fenoles, precursores de melanina), mientras que solventes no polares (hexano) toman preferentemente sustancias lipofílicas.

Sensibilizador: Sustancia que absorbe radiación en una región específica del espectro y transfiere electrones al material semiconductor en una celda solar. En este caso, se emplean pigmentos fúngicos o liquénicos como sensibilizadores naturales.

TiO₂ (Dióxido de Titanio): Semiconductor usado comúnmente en DSSC. Es el soporte donde se depositan los pigmentos y sirve para transportar los electrones inyectados por la luz. Destaca por su estabilidad, abundancia y band gap apropiado.

Transferencia de energía: Proceso mediante el cual la energía absorbida por un pigmento (como parietina) es transmitida a otro pigmento sin necesidad de mover un electrón. Es clave para la eficiencia fotosintética y para el rendimiento de pigmentos en DSSC.

Voltaje de Circuito Abierto (Voc): El voltaje máximo que entrega la celda cuando no circula corriente. Se mide con un multímetro sin carga entre el electrodo (semiconductor + pigmento) y el contraelectrodo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Alamu, G. A., Ayanlola, P. S., Babalola, K. K., Adedokun, O., Sanusi, Y. K., & Fajinmi, G. R. (2024). Green synthesis and characterizations of magnetic iron oxide nanoparticles using *Moringa oleifera* extract for improved performance in dye-sensitized solar cell. *Chemical Physics Impact*, 8, 100542.

Arce-Torres, L. F., Gómez-Díaz, I., Monge-Artavia, M., & Prado-Cordero, J. (2020). Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(3), 90–99.

Artetxe, U., Becerril, J. M., Martínez-Abaigar, J., Núñez-Olivera, E., & García-Plazaola, J. I. (2018). ¿Can parietin transfer energy radiatively to photosynthetic pigments? *Molecules*, 23(7), 1741.

Beckett, R. P., Solhaug, K. A., Gauslaa, Y., & Minibayeva, F. V. (2018). Improved photoprotection in melanized lichens is a result of fungal solar-radiation screening rather than photobiont acclimation. *The Lichenologist*, 50, 397–406.

Carvalho, T. O., et al. (2014). Biosynthesis of fungal pigments: Perspectives and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 34(3), 231–243.

Chen, L.-C., Chen, C.-C., & Tseng, B.-S. (2010). Improvement of short-circuit current density in dye-sensitized solar cells using sputtered nanocolumnar TiO₂ compact layer. *Journal of Nanomaterials*, 2010, Article 374052. P.2

Cerda, B. (2015). Módulos de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante. ((Tesis de magíster, Universidad de Concepción) Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Disponible en: <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/1957>

Cerda, B. (2024). Desarrollo de celdas solares sensibilizadas con colorantes naturales y co-sensibilizadas con nanopartículas de plata y puntos cuánticos. (Tesis doctoral, Universidad de Concepción) Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Disponible en: <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/4683>

Cerovic, Z. G., Ounis, A., Cartelat, A., Latouche, G., Goulas, Y., Meyer, S., & Moya, I. (2002). The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the non-destructive *in situ* assessment of UV-absorbing compounds in leaves. *Plant, Cell & Environment*, 25(12), 1663–1676.

Chava, R. K., Yu, Y.-T., & Kang, M. (2024). Layer-by-layer deposition of hollow TiO₂ spheres with enhanced photoelectric conversion efficiency for dye-sensitized solar cell applications. *Nanomaterials*, 14, 1782. MDPI.

Chen, F., & Feng, L. (2011). Determination of protocatechuic acid in Cortex *Acanthopanax* using high-performance liquid chromatography coupled with four-channel UV–visible detector. *Anhui Agricultural Sciences*, 39(26), 15950–15951.

Cordero, R. J., & Casadevall, A. (2017). Functions of fungal melanins and their potential as targets for antifungal therapy. *Frontiers in Microbiology*, 8, 24.

Danladi, E., Onimisi, M. Y., Abdu, S. G., Musa, P. M., & Jonathan, E. (2016). Enhanced performance of a dye-sensitized solar cell using silver nanoparticles modified photoanode. *Journal of Scientific Research & Reports*, 10(4), 1–8.

Dhorkule, M., Lamrood, P., Ralegankar, S., Patole, S., Wagh, S., & Pathan, H. (2024). Unveiling the efficiency of dye-sensitized solar cells: A journey from synthetic to natural dyes. *ES Food and Agroforestry*. Engineering Science Publisher, USA.

Dufossé, L. (2011). Fungal pigments: From production to applications. In S. Gupta (Ed.), *Sustainable Production of Natural Pigments* (pp. 65–80). Springer.

Durán, N., Marcato, P. D., Alves, O. L., De Souza, G. I. H., & Esposito, E. (2005). Silver nanoparticle production by the fungus *Fusarium oxysporum*. *Journal of Nanobiotechnology*, 3(1), 8.

Feijóo-Vivas, K., Bermúdez-Puga, S. A., Rebolledo, H., Figueroa, J. M., Zamora, P., & Naranjo-Briceño, L. (2020). Bioproductos desarrollados a partir de micelio de hongos: Una nueva cultura material y su impacto en la transición hacia una economía sostenible. *Revista Bionatura*, 6(1), 1637–1652.

Gill, R. (2003). Fungal pigments: Structure, function, and biotechnological applications. *International Journal of Mycology*, 12(1), 1–20.

Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio De Medicina Y Cirugía*, 27(2), 75–80

Hawksworth, D. L., & Lücking, R. (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology Spectrum*, 5(4).

IPCC. (2023). Sections. In *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

Jamalullail, N., Mohamad, I. S., Norizan, M. N., Baharum, N. A., & Mahmed, N. (2017). *Short review: Natural pigments photosensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC)*. En *2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORed)* (pp. 344–349).

Lagashetti, A. C., Dufossé, L., Singh, S. K., & Singh, P. N. (2019). Fungal pigments and their prospects in different industries. *Microorganisms*, 7, 604. MDPI.

Lee, T. D., & Ebong, A. U. (2016). A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1286-1297.

Li, X., Yang, W., Deng, J., & Lin, Y. (2023). Surface plasmon resonance effects of silver nanoparticles in graphene-based dye-sensitized solar cells. *Frontiers in Materials*, 10, Article 1137771.

Lorenz, C., Bianchi, E., Alberini, A., Poggiali, G., Benesperi, R., Papini, A., & Brucato, J. R. (2024). UV photo-degradation of the secondary lichen substance parietin: A multi-spectroscopic analysis in astrobiology perspective. *Life Sciences in Space Research*, 41, 191-201.

Manojlovic, N., Vasiljević, P., Gritsanapan, W., Supabphol, R., & Manojlovic, I. (2010). Phytochemical and antioxidant studies of *Laurera benguelensis* growing in Thailand. *Biological Research*, 43(2), 169–176.

Mansuri, A., & Desai, S. (2019). Factorial design for optimization of HPLC-UV method for quantification of gallic acid in Lohasava and Pippalyasava. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 53(3 Suppl 2), s347-s355.

Masís-Ramos, S., Meléndez-Navarro, P., & Méndez-Rodríguez, E. (2021). Potencial biotecnológico de los hongos marinos en las zonas costeras de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(2), 48–59.

Mcoyi, M. P., Mpofu, K. T., Sekhwama, M., & Mthunzi-Kufa, P. (2024). *Developments in localized surface plasmon resonance. Plasmonics*. Advance online publication.

Narsing Rao, M. P., Xiao, M., & Li, W. J. (2017). Fungal and bacterial pigments: Secondary metabolites with wide applications. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1113.

Naveen, H., & Prasad, T. N. V. K. V. (2013). Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using the fungus *Penicillium* sp. *Archives of Applied Science Research*, 5(1), 15–19.

Pal, M., & Rai, M. (2019). Fungal pigments: An emerging source of natural colorants for food, textile, and pharmaceutical industries. *Journal of Applied Microbiology*, 126(1), 97–112.

Parveen, F., Jagtap, C. V., & Manjula, V. T. (2024). Copper nanoparticles incorporated titanium dioxide photoanode for plasmonic dye sensitized solar cell. *Engineered Science General*, 5, 1163.

Putri, T. D. A., Nurosyid, F., Iriani, Y., & Suryana, R. (2025). Modification of the working electrode using silver nanoparticle (AgNP) doping to enhance the efficiency of dye-sensitized solar cells (DSSC). *Journal of Physics: Conference Series*, 2945(1).

Rotondella, G. (2024). Different gold nanoparticles used to optimize DNA-PAINT microscopy: Investigation of their properties and new applications in nanomedicine. *Master's Thesis in Biomedical Engineering, Academic Year 2024/2025*. Politécnico de Turín, Italia.

Sheikhloo, Z., Salouti, M., & Katiraei, F. (2011). Biological synthesis of gold nanoparticles by fungus *Epicoccum nigrum*. *Journal of Cluster Science*, 22(4), 661–665.

Shimadzu Corporation. (2025, abril). Detector de vacío ultravioleta VGA-100 / VGA-101 para cromatografía de gases (Folleto técnico N° C180-E102). Recuperado de:

https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_documento_file/brochures/25243/c180-e102.pdf

Silveira, E. (2016). Un microproductor de plata. *Revista Pesquisa FAPESP*, (240). <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/un-microproductor-de-plata/>

Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2021). *Trichoderma*: An eco-friendly source of nanomaterials for agricultural and biomedical applications. *Journal of Fungi*, 7(4), 246.

Solhaug, K. A., Larsson, P., & Gauslaa, Y. (2020). Shade lichens are characterized by rapid relaxation of non-photochemical quenching on transition to darkness. *The Lichenologist*, 52, 419–432.

Tesoro, C., Lelario, F., Ciriello, R., Bianco, G., Di Capua, A., & Acquavia, M. A. (2022). An overview of methods for L-Dopa extraction and analytical determination in plant matrices. *Separations*, 9, 224.

Tropea, A., Spadaro, D., Trocino, S., Giuffrida, D., Salerno, T., Ruiz Sanchez, J., Montañez, J., Morales Oyervides, L., Dufossé, L., Mondello, L., & Calogero, G. (2024). Development of dye-sensitized solar cells using pigment extracts produced by *Talaromyces atrovirens* GH2. *Photochemical & Photobiological Sciences*. Springer Nature.

Velisek, L., & Cejpek, K. (2011). Pigments of higher fungi – a review. *Czech J. Food Sci.*, 29: 87–102.

Webster, J., & Weber, R. (2007). *Introduction to Fungi*. Cambridge University Press, Inglaterra.

White Thompson S. (2020). Demostrando la interdisciplinariedad de las ciencias utilizando celdas solares orgánicas sensibilizadas con *Capsicum annuum* (Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción). Facultad de Educación.

Whitmarsh, J. (1995). Photosynthesis. *Agricultural Research Service/USDA, Department of Plant Biology, University of Illinois, U.S.A.*

Zhang, Y., Wu, X., Huang, C., Zhang, Z., & Gao, W. (2022). Isolation and identification of pigments from oyster mushrooms with black, yellow and pink caps. *Food Chemistry*, 372.

Zhou, Y., & Liu, X. (2010). Pigments of fungi (Macromycetes). *Journal of Natural Products*, 27, 1531–1570.

VIII. APÉNDICE

Tabla 8.1 Datos completos de conversión energética de las DSSC en base de TiO₂ con pigmento de *P. otreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, respectivamente, extraídos en etanol, metanol y hexano. entregados por el Simulador Solar donde $P.o. = P. otreatus$, $S.h. = S. hirsutum$ y $X.p = X. parietina$

File Number	Isc(Amps)	Voc (Volts)	Vmax (Volts)	I _{max} (Amps)	P _{max} (Watts)	Fill Factor (FF)	Efficiency(%)	R _{series} (Ohms)	R _{shunt} (KOhms)	J _{sc} (Amps/cm ²)	R _s (Ohms/cm ²)	R _{sh} (Ohms/cm ²)	Irradiance (W/cm ²)	Device Area (cm ²)
TiO ₂	0.00031	0.45	0.32	0.00022	0.00007	0.49	0.019	77.09	8.51	0.00009	7.56	0.00042	1000	3.5
P.o etanol	0.00035	0.52	0.37	0.00026	0.00010	0.52	0.027	49.46	7.56	0.00010	36.57	0.00047	1000	3.5
P.o metanol	0.00029	0.51	0.37	0.00022	0.00008	0.53	0.023	59.13	10.52	0.00009	16.44	0.00035	1000	3.5
P.o hexano	0.00025	0.45	0.30	0.00016	0.00005	0.41	0.013	122.49	4.51	0.00007	31.02	0.00084	1000	3.5
S.h. etanol	0.00038	0.47	0.34	0.00031	0.00011	0.60	0.030	561.59	9.08	0.00011	170.45	0.00068	1000	3.5
S.h. Metanol	0.00041	0.50	0.37	0.00031	0.00012	0.55	0.032	33.38	6.89	0.00012	20.44	0.00051	1000	3.5
S.h. hexano	0.00008	0.44	0.31	0.00006	0.00002	0.50	0.006	434.33	42.98	0.00002	58.38	0.00011	1000	3.5
X.p. etanol	0.00039	0.49	0.38	0.00029	0.00011	0.56	0.031	81.02	10.39	0.00011	10.13	0.00035	1000	3.5
X.p. metanol	0.00053	0.52	0.39	0.00043	0.00016	0.60	0.047	42.55	7.47	0.00015	25.57	0.00047	1000	3.5
X.p. hexano	0.00002	0.35	0.19	0.00002	0.00000	0.31	0.001	1381.95	25.36	0.00001	96.96	0.00010	1000	3.5

Tabla 8.2 Datos completos de conversión energética de las DSSC en base de TiO₂ con pigmento de *X. parietina* extraído en metanol, sensibilizadas con nanopartículas de plata de *P. ostreatus*, *S. hirsutum* y *X. parietina*, entregados por el Simulador Solar donde P.o. = *P. ostreatus*, S.h. = *S. hirsutum* y X.p = *X. parietina*.

File Number	Isc(Amps)	Voc (Volts)	Vmax (Volts)	Imax (Amps)	Pmax (Watts)	Fill Factor (FF)	Efficiency(%)	Rseries (Ohms)	Rshunt (KOhms)	Jsc (Amps/cm ²)	Rs (Ohms/cm ²)	Rsh (Ohms/cm ²)	Irradiance (W/cm ²)	Device Area (cm ²)
TiO ₂	0.00031	0.48	0.35	0.00021	0.000073	0.49	0.020	10075	5.37	0.00009	2875.2	0.00092	1000	3.5
P.O.	0.00033	0.32	0.20	0.00022	0.000061	0.36	0.017	83	5.05	0.00009	23.7	0.00272	1000	3.5
S.H.	0.00040	0.43	0.27	0.00025	0.000076	0.38	0.022	70	2.89	0.00011	19.8	0.00156	1000	3.5
X.P.	0.00056	0.52	0.33	0.00039	0.000130	0.46	0.037	52	5.80	0.00016	15.2	0.00087	1000	3.5

