

# Use of residual purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) skin pigment in dye-sensitized solar cells

Renny Nazario-Naveda<sup>1</sup>, Moisés Gallozzo-Cárdenas<sup>2</sup>, Luisa Juárez-Cortijo<sup>3</sup>, Daniel Delfin-Narciso<sup>3</sup>, Luis Angelats-Silva<sup>4</sup>, Segundo Rojas-Flores<sup>1</sup> and Santiago M. Benites<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú; renny.nazario@autonoma.pe

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad César Vallejo, Trujillo 13001, Perú; mmgallozzo@ucvvirtual.edu.pe

<sup>3</sup> Grupo de Investigación de Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo 13007, Perú; luisa.juarez@upn.edu.pe

<sup>4</sup> Laboratorio de Investigación Multidisciplinario, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo 13008, Perú; langelatss@upao.edu.pe

**Abstract**– The objective of the following work was to study the usefulness of the pigment obtained from the peel of purple sweet potato to sensitize solar cells. Cells were built using ITO conductive sheets coated with a layer of TiO<sub>2</sub> nanoparticles as a photoanode and carbon as a counter electrode, alcoholic purple sweet potato peel extract was prepared which was integrated into the TiO<sub>2</sub> layer as dye-sensitizer. The performance of DSSCs was studied by irradiating them with light at different wavelengths with constant power. The electrochemical results show values of  $V_{oc} = 0.374$  V,

$J_{sc} = 0.0183$  mA/cm<sup>2</sup>,  $FF = 0.471$  and an efficiency of 0.0107 % for when the cells were irradiated with 470 nm light. The EIS results confirm this performance by showing a low resistance to the flow of free charges under this wavelength. This work contributes to the use of organic waste material from purple sweet potato to obtain pigments and take advantage of their action in the operation of DSSCs.

**Keywords**— DSSC, purple sweet potato, TiO<sub>2</sub>, anthocyanin, dye-sensitizer.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Uso de residuos de cáscara de camote morado (*Ipomoea batatas L.*) en celdas solares sensibilizadas por colorantes

Renny Nazario-Naveda<sup>1</sup>, Moisés Gallozzo-Cárdenas<sup>2</sup>, Luisa Juárez-Cortijo<sup>3</sup>, Daniel Delfin-Narciso<sup>3</sup>, Luis Angelats-Silva<sup>4</sup>, Segundo Rojas-Flores<sup>1</sup> and Santiago M. Benites<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú, renny.nazario@autonoma.pe

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad César Vallejo, Trujillo 13001, Perú; mmmgallozzo@ucvvirtual.edu.pe

<sup>3</sup> Grupo de Investigación de Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo 13007, Perú; luisa.juarez@upn.edu.pe

<sup>4</sup> Laboratorio de Investigación Multidisciplinario, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo 13008, Perú; langelats@upao.edu.pe

**Resumen**– El objetivo del siguiente trabajo fue estudiar la utilidad del colorante obtenido de la cáscara del camote morado en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC). Las celdas se construyeron utilizando láminas conductoras de ITO recubiertas con una capa de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> como fotoánodo y partículas de carbono como contraelectrodo, se preparó extracto alcohólico de cáscara de camote morado que se integró en la capa de TiO<sub>2</sub> como sensibilizador por colorante. El rendimiento de las DSSCs se estudió irradiándolos con luz a diferentes longitudes de onda con potencia constante. Los resultados electroquímicos muestran valores de  $V_{oc} = 0.374$  V,  $J_{sc} = 0.0183$  mA/cm<sup>2</sup>,  $FF = 0.471$  y una eficiencia de 0.0107 % para cuando las celdas fueron irradiadas con luz de 470 nm. Los resultados de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) confirman este desempeño al mostrar una baja resistencia al flujo de cargas libres bajo esta longitud de onda. Este trabajo contribuye al aprovechamiento de material de desecho orgánico de camote morado para obtener colorantes y aprovechar su acción en el funcionamiento de las DSSCs.

**Palabras clave:** DSSC, camote morado, nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, antocianinas, sensibilizador por colorantes.

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha surgido una creciente preocupación mundial por la contaminación ambiental y se ha vuelto fundamental investigar formas de mejorar la eficiencia en el uso de energía natural y reciclar la energía regenerada [1]. La energía eléctrica desempeña un papel vital en la vida humana, ya que casi todos los electrodomésticos y otros dispositivos utilizan esta forma de energía. Actualmente, se obtiene energía eléctrica principalmente a partir de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón [2-4]. Estas fuentes de energía no renovables tienen el riesgo de agotarse en el futuro [4]; asimismo, perjudican de manera significativa el medio ambiente pues emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub> que están fomentando el cambio climático [3,4]. Por otro lado, el sol es una fuente de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente [5].

Una alternativa para utilizar la energía solar como fuente de electricidad es mediante el uso de celdas solares, también conocidas como celdas fotovoltaicas. El principio básico de fabricación de estas celdas consiste en aprovechar el efecto fotovoltaico [5]. Un tipo de celda solar que se utiliza es la Celda Solar Sensibilizada por Colorante (DSSC, por sus siglas en inglés), que es un semiconductor recubierto con colorante y que tiene una estructura similar a un sándwich [6-11]. Esta celda consta de varios componentes principales, como un vidrio recubierto con óxidos conductores transparentes, semiconductores, sensibilizadores por colorantes, un electrolito que contiene mediadores redox y electrodos de trabajo (semiconductor-teñido) y contraelectrodo (carbono) que funcionan como catalizadores, ambos recubiertos en el vidrio conductor. El óxido conductor más usado es el TiO<sub>2</sub>; así, Ref. [7] discutió sobre las nanoestructuras utilizadas para DSSCs, siendo la nanoestructura de TiO<sub>2</sub> la más reportada; alcanzando un nivel de eficiencia del 10,3%.

Se han realizado numerosos estudios en los que se han utilizado colorantes naturales obtenidos de diversas plantas, frutos, tubérculos, etc., con el fin de absorber la luz solar y sensibilizar la extracción de electrones del semiconductor TiO<sub>2</sub>. Dichos materiales orgánicos contienen compuestos como clorofila, antocianinas y/o betacarotenos que se absorben a diferentes longitudes de onda, por lo que su estudio en DSSC es muy importante por su eficacia, fácil obtención y baja toxicidad [6-15]. Ref. [9] fabricó DSSCs basados en un tinte natural extraído de la *Punica Granatum*, las celdas solares se construyeron con una película delgada de TiO<sub>2</sub> sobre un vidrio recubierto de ITO. Se obtuvo una eficiencia de conversión de energía solar de 1,86%, con una densidad de corriente  $J_{sc}$  de 3.341 mA/cm<sup>2</sup> con una irradiación de 100 mW/cm<sup>2</sup> a 25 °C. Por otro lado, el uso de colorantes obtenidos de cáscaras de camote es poco reportado. Así, Ref. [16], logró fabricar DSSCs usando antocianinas extraídas de camote morado seco, logrando producir electricidad durante 15 días con un voltaje máximo de 0.25 V y corriente eléctrica de 0.12 A. Ref. [17] logró sintetizar dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en fase anatasa y fabricar celdas solares sensibilizadas por colorantes

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

a base de antocianinas de camote morado, obtuvieron un rendimiento lo suficientemente bueno para DSSCs construidos con TiO<sub>2</sub> mesoporoso recocido a 550 °C. Ref. [18] determinó las características del colorante de camote morado y zanahoria frente al rango de absorción de la luz solar y sus grupos funcionales para las aplicaciones de DSSCs, sus resultados mostraron que para una longitud de onda de absorción del colorante de camote morado máxima de 444 nm se obtuvo un band-gap de 2,79 eV; mientras que, en el colorante de zanahoria y una mezcla de los dos colorantes, los band-gaps obtenidos de 2,91 eV y 2,92 eV se basan en las longitudes de onda máximas (426 nm y 424 nm). A pesar de los resultados relativamente grandes de band-gap no se muestran resultados claros sobre las características de las DSSCs. Ref. [19] fabricó DSSCs usando extracto de camote con pico de absorbancia en 532 nm depositadas en una película delgada de TiO<sub>2</sub>, obteniendo una eficiencia de 0.0192 %. Finalmente, Ref. [20] logró fabricar DSSCs usando vidrio Giant Magnetoresistance (GMR) como sustrato y colorantes naturales a partir de camote morado (*Ipomoea batatas L.*), sus resultados muestran una eficiencia de 0.19% usando una concentración de 50% de extracto, mientras que con un tiempo de absorción del extracto de 5 horas la eficiencia es de 0.72%.

De acuerdo a lo visto anteriormente, es necesario aún profundizar en la investigación del uso de colorantes obtenidos de residuos orgánicos como las antocianinas que se encuentran en el camote morado y que pueden ser usadas como sensibilizadores y donantes de electrones en las DSSCs. Por tal motivo, esta investigación se realizó con el objetivo de estudiar las características electroquímicas de las DSSCs usando como colorante sensibilizador el extracto de camote morado del norte del Perú y de esa manera contribuir con el desarrollo de esta tecnología, además de promover el uso de los desechos orgánicos dejado por estos tubérculos muy consumidos en nuestros países latinoamericanos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los reactivos usados en la investigación fueron etilenglicol, etanol, ácido acético, yoduro de potasio y yodo de Merck, Alemania. Se compró TiO<sub>2</sub> con fase anatasa y una pureza de más del 99,8 % de Merck, Alemania. Se usó vidrio conductor de óxido de estaño dopado con indio (ITO) con resistencia de lámina de 10 Ω/cm<sup>2</sup>.

### A. Extracción de tinte natural

Se usó cáscaras de camote morado (*Ipomoea batatas L.*) obtenidas de un mercado local de la ciudad de Trujillo, Perú. Las cáscaras fueron secadas al sol por 48 horas para luego ser trituradas hasta convertirlas en polvo. El polvo de cáscara de camote morado (15 g) fue colocado en suspensión en 100 mL de alcohol comercial 96% de Alkofarma, Perú. La suspensión fue llevada a ultrasonido durante un tiempo de 30 minutos para luego dejarse en proceso de maceración por 48 horas. Al término, el extracto fue llevado nuevamente al ultrasonido por

un tiempo de 30 minutos, para finalmente separar el sobrenadante y restos sólidos mediante filtración usando un filtro Whatman de 42/125 mm. El extracto obtenido se mantuvo en almacenamiento a 4 °C.

### B. Preparación de pasta de TiO<sub>2</sub>

La pasta de TiO<sub>2</sub> se preparó mezclando polvo de TiO<sub>2</sub> en fase anatasa, ácido acético y etanol. Se disolvieron 2 g de TiO<sub>2</sub> en 20 mL de etanol revolviendo la mezcla hasta su homogeneidad, luego se añadió gota a gota 0.8 mL de ácido acético y se mezcló hasta obtener una pasta.

### C. Preparación de solución electrolítica

La solución de electrolito utilizada se preparó mezclando 0,83 gramos de yoduro de potasio (KI) en 10 ml de etilenglicol. Luego se añadieron 0,127 gramos de yodo (I<sub>2</sub>) a la solución y se agitó mediante un agitador magnético. La solución se almacenó en una botella de color ambar y se cerró herméticamente.

### D. Preparación de contraelectrodo

El contra electrodo se preparó mediante la deposición de hollín de una vela encendida. Se usó una placa de vidrio ITO cortada con las mismas dimensiones que la placa con TiO<sub>2</sub>. Se encendió una vela, se sostuvo con unas pinzas el trozo de vidrio ITO, con el lado conductor hacia abajo, a unos 5 a 10 cm por encima de la llama hasta obtener una capa homogénea. El carbono de la combustión de la cera se transporta en el humo y forma una deposición negra en el lado conductor del vidrio ITO.

### E. Ensamble de DSSCs

Se usaron dos láminas de vidrio ITO de 2x2.5 cm<sup>2</sup> para depositar la pasta de TiO<sub>2</sub> y para el contraelectrodo, se utilizó cinta adhesiva 3M como espaciador que cubría un ancho de 1 cm desde el lado conductor de ambas láminas, de modo que se formó un área libre de 2x1.5 cm<sup>2</sup>. La pasta de TiO<sub>2</sub> fue depositada sobre la superficie conductora de uno de los vidrios ITO mediante la técnica de deposición “doctor-blade” con la ayuda de una varilla de vidrio para esparcirla. Después, la película fue sometida a un tratamiento térmico de 300 °C por 30 minutos en un hot-plate. A continuación, se añadió por goteo el colorante de extracto de cáscara de camote morado sobre la película de TiO<sub>2</sub>, este proceso se realizó hasta 4 veces teniendo en cuenta la saturación del extracto y su secado sobre la película de ITO para lograr la adsorción de antocianina sobre la superficie de TiO<sub>2</sub>. Finalmente, se añadió la solución de electrolito sobre la superficie de TiO<sub>2</sub> y se cubrió con el contraelectrodo para formar una estructura tipo sándwich. La estructura de la celda se sujetó con sujetapapeles en ambos lados para asegurar los dos electrodos.

### F. Técnicas de caracterización

Para caracterizar la estructura cristalina de la pasta de TiO<sub>2</sub> y las partículas de carbono se usó un difractor de rayos X Bruker D8 Eco Advance, con radiación Cu-Kα y con

un paso de  $0.02^\circ$ . La morfología de las películas preparadas fue evaluada mediante microscopía electrónica de barrido (STEM Vega 3 LMU-Tescan). Además, se realizaron experimentos de dispersión de luz dinámica (Nicom Nano Z3000) para caracterizar la distribución de tamaño de las partículas de  $\text{TiO}_2$ . Mientras que las propiedades ópticas del extracto de cáscara de camote morado fueron caracterizadas utilizando un espectrofotómetro UV-vis Lambda 750 Perkin-Elmer a temperatura ambiente. Además, la determinación de grupos funcionales del extracto se realizó mediante espectrofotometría FTIR (Thermo Fisher Nicolet iS-50).

El rendimiento fotovoltaico de las DSSCs producidos se evaluó mediante mediciones con iluminación constante utilizando una fuente de luz LED en combinación con Autolab PGSTAT bajo una intensidad de luz máxima de  $30 \text{ mW/cm}^2$  con diferentes longitudes de onda del espectro visible (470, 505, 530, 590 y 627 nm). Los resultados medidos se trazaron en una curva I/V, a partir de la cual se pueden obtener los datos de voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$  (V), densidad de corriente de cortocircuito  $J_{SC}$  ( $\text{mA/cm}^2$ ), factor de llenado (FF) y eficiencia de conversión  $\eta\%$ . Mientras tanto, las mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica se evaluaron con un sistema potenciostato/galvanostato Metrohm Autolab PGSTAT302N. Los espectros de impedancia se obtuvieron dentro del rango de frecuencia de 10 mHz y 100 kHz con un voltaje constante de 10 mV.

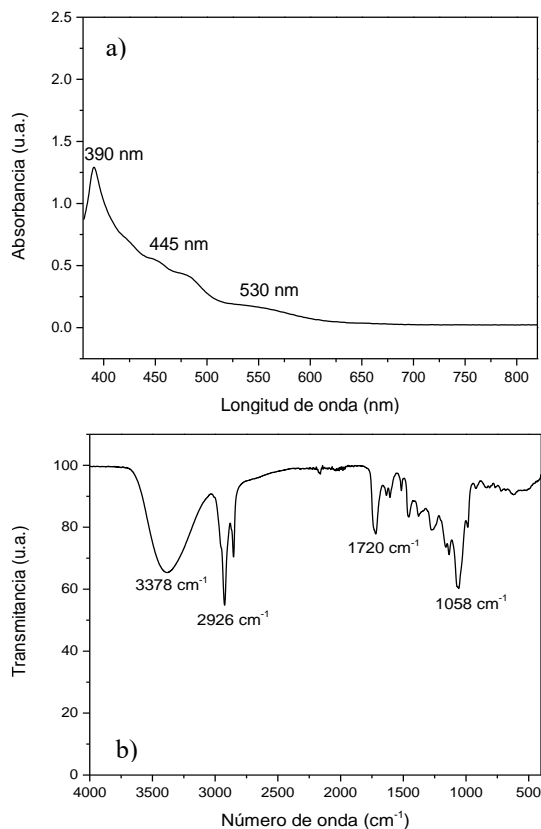


Fig. 1 a) Espectro de absorción UV-Vis y b) Espectro FTIR del extracto de cáscara de camote morado.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características ópticas del extracto de cáscara de camote morado se estudiaron utilizando un espectrofotómetro UV-Vis para determinar la absorción de luz por parte de los colorantes de antocianinas y betacarotenos presentes en el camote morado. Las condiciones de secado y los disolventes empleados para la extracción pueden afectar el contenido de antocianinas, la actividad antioxidante y el contenido fenólico de los extractos producidos [21,22]. Este comportamiento se muestra en la Figura 1a. Se puede observar que el espectro de absorción está en el rango de longitud de onda de 350-550 nm con picos de absorción en 390 nm, 445 y 530 nm [18,20,23]. Según Ref. [24] la presencia de esos picos corresponde a diferentes tipos de antocianinas. Los resultados demuestran que el extracto de cáscara de camote morado es bueno para ser usado como colorante en DSSCs, verificando la absorción de la longitud de onda más eficiente.

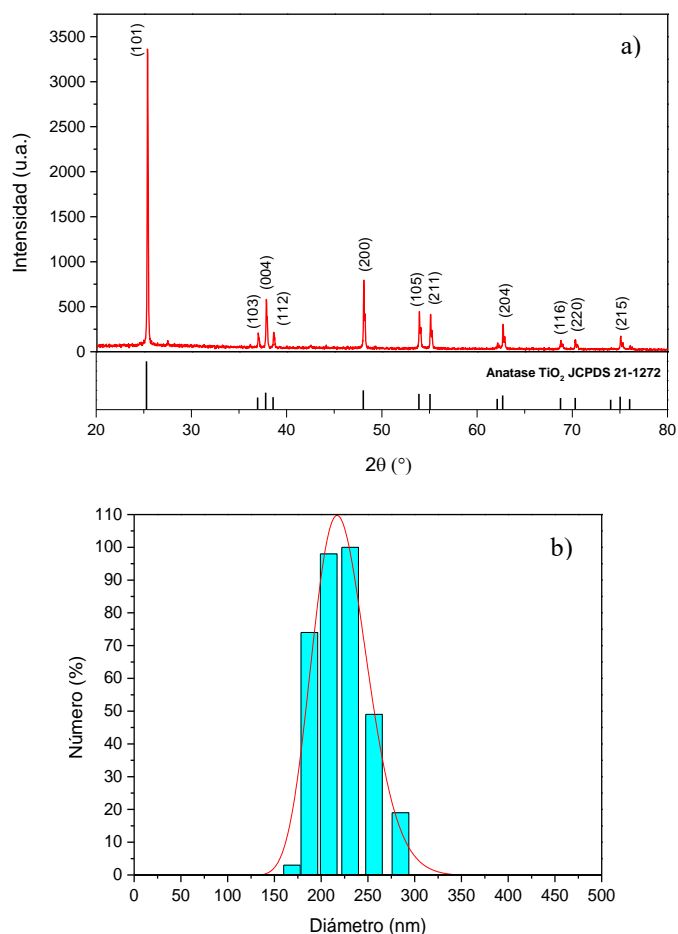


Fig. 2 a) Patrones de Difracción de Rayos X and b) Dynamic Light Scattering de partículas de  $\text{TiO}_2$ .

Para determinar los grupos funcionales contenidos en el extracto de cáscara de camote morado se realizó un análisis FTIR. El análisis se llevó a cabo en el rango de  $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$  y se presenta en la Figura 1b. Se observa los grupos hidroxilo

en el número de onda  $3377.71\text{ cm}^{-1}$ , este grupo hidroxilo indica la presencia de grupos  $-\text{OH}$  en compuestos de antocianinas o compuestos alcohólicos en solución. Esto también está respaldado por la aparición del pico de absorción en el número de onda  $1058.2\text{ cm}^{-1}$  para el enlace  $\text{C-O}$  del alcohol. La presencia de estos grupos indica la presencia de fenoles en compuestos de antocianinas o compuestos de alcohol en el extracto. Por otro lado, la absorción del doble enlace aromático  $-\text{C}=\text{C}$  se muestra mediante la absorción en el número de onda  $1720.1\text{ cm}^{-1}$ . La unión que se produce en el colorante de antocianina con el  $\text{TiO}_2$  puede producirse a través de un enlace que se encuentra en el grupo hidroxilo de la antocianina y es importante en el proceso de extracción de electrones y la generación de corriente eléctrica en el circuito DSSC, en presencia de luz provoca la excitación de electrones en la banda de conducción del semiconductor  $\text{TiO}_2$  que fluyen a través del vidrio conductor provocando una corriente eléctrica [25].

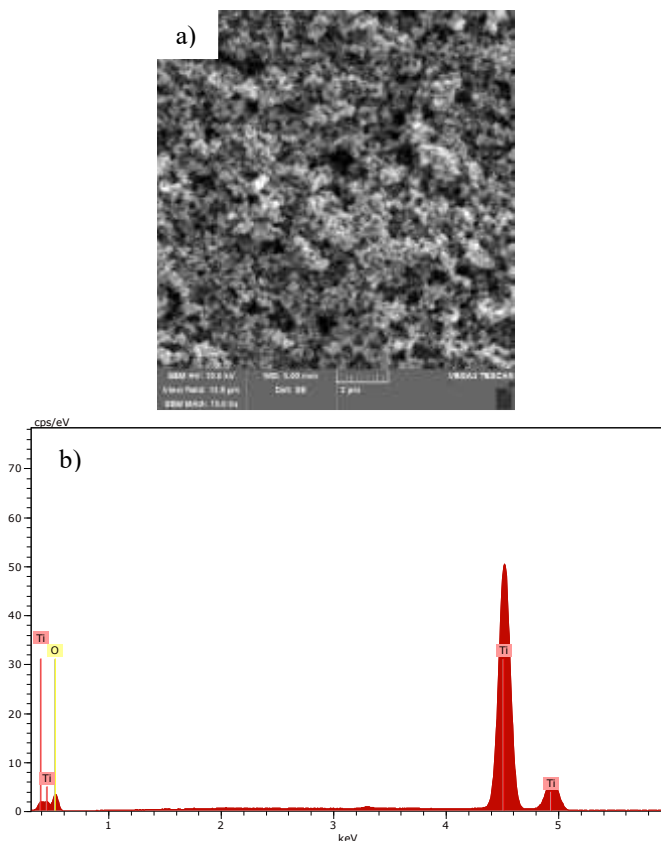


Fig. 3 a) Morfología de la superficie por SEM y b) Espectro EDS de una película de  $\text{TiO}_2$  preparada después de un tratamiento térmico a  $300\text{ }^\circ\text{C}$  durante 30 min.

En la Figura 2a se observa los patrones de difracción de rayos X de dióxido de titanio en la fase anatasa. Según los resultados, las posiciones de los picos de difracción principales en  $25^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $55^\circ$  y  $63^\circ$  con los índices (101), (004), (200), (105), (211) y (204) respectivamente, con

planos cristalinicos del  $\text{TiO}_2$  centrado en el cuerpo tetragonal. Además, los patrones XRD revelaron la fase anatasa mediante los picos en  $25^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $48^\circ$  y  $55^\circ$ . Se confirmó que el tratamiento térmico a  $300^\circ$  permitieron una buena cristalización del material. Por otro lado, los resultados de DLS que se muestran en la Figura 2b muestran la distribución de tamaño de las partículas de  $\text{TiO}_2$  usadas para preparar la pasta, el tamaño promedio de las partículas es de aproximadamente 236 nm.

La Figura 3a muestra la imagen de microscopía electrónica de barrido de las películas de  $\text{TiO}_2$  después del tratamiento térmico en hot-plate a  $300\text{ }^\circ\text{C}$  for 30 minutos. Los resultados revelaron que los fotoánodos recubiertos con las pastas preparadas tenían una morfología homogénea sin aglomeración y con la mayoría de las partículas esféricas. Los resultados confirmaron que la capa de pasta de  $\text{TiO}_2$  obtenida tiene una estructura similar a una esponja, lo cual resulta en una ventaja para lograr un DSSC de alta eficiencia y es similar a lo presentado por otros trabajos [26]. La porosidad observada puede deberse a la adición de ácido acético, ya que el ácido acético se puede adsorber en la superficie de  $\text{TiO}_2$  y evita que las partículas se agreguen [27]. Además, la Figura 3b muestra el análisis por espectroscopia de dispersión de energía (EDS), se confirmó la presencia de Titanio (Ti) y Oxígeno (O).

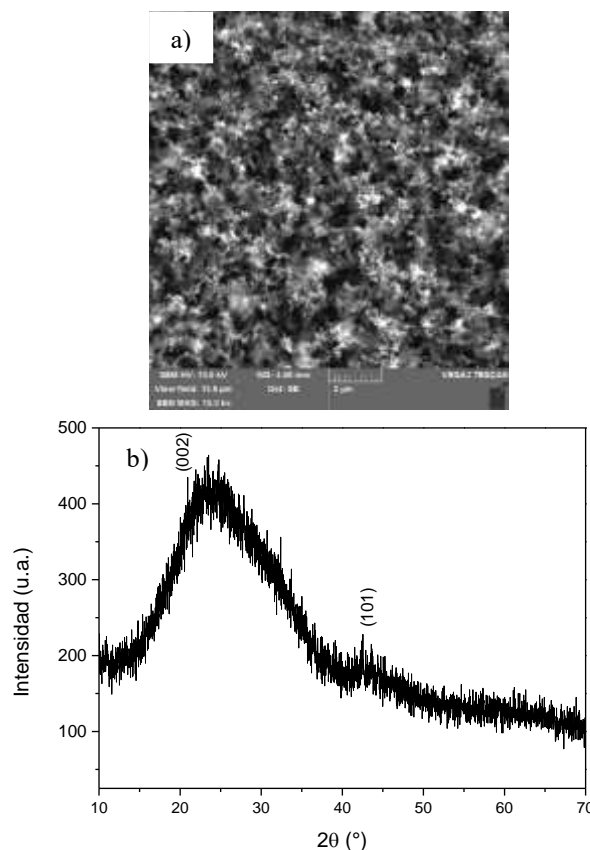


Fig. 4 a) Morfología de superficie por SEM y b) Patrones de Difracción de Rayos X de partículas de carbono del contraelectrodo preparadas mediante combustión de una vela.



Se realizó un análisis de difracción de rayos X (XRD) para identificar la estructura cristalina de las partículas de carbono obtenidas a partir de la combustión de la vela. La Figura 4b muestra los patrones de estas partículas en la que se observa dos picos de difracción en  $26^\circ$  y  $44^\circ$  que corresponden a una red de grafito hexagonal de nanopartículas de carbono de pared múltiple. El pico  $26^\circ$  es un pico ancho con alta intensidad y que está indexado como plano (002), mientras que el pico de baja intensidad en  $44^\circ$  está indexado como plano (101), esto indica la existencia de cantidades de material amorfo junto a la presencia de nanomateriales de carbono de baja calidad [28]. La morfología de las partículas de carbono también se identificó mediante microscopía electrónica de barrido y se muestra en la Figura 4a. Se observa la morfología de una superficie porosa de partículas de carbono unidas en una forma de red, identificando granos de partículas casi esféricas.

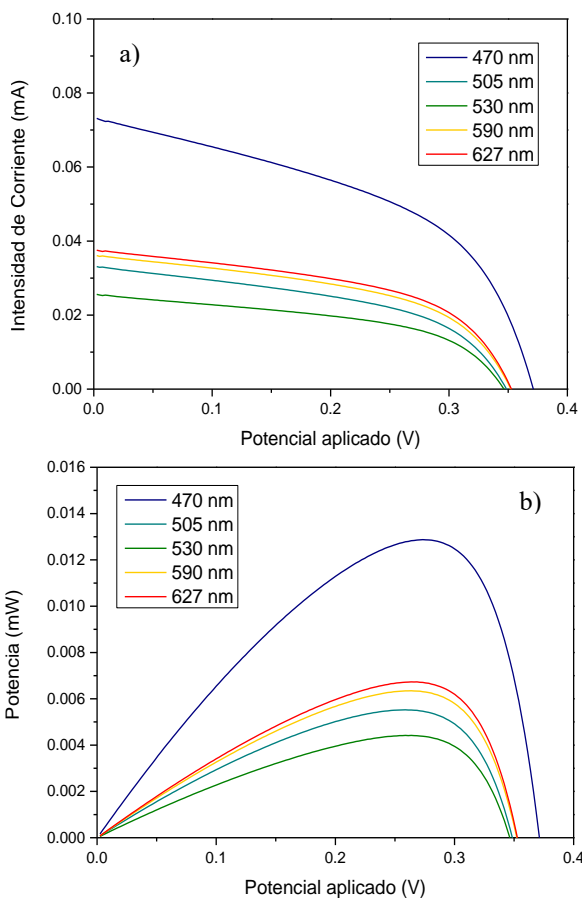


Fig. 5 a) Curva I-V y b) Diagrama de potencia de DSSCs sensibilizadas con extracto de cáscara de camote morado.

La Figura 5 muestra las curvas I-V y de Potencia de las DSSCs fabricadas usando extracto de cáscara de camote morado como colorante. Además, la Tabla 1 muestra los parámetros fotovoltaicos de las DSSCs obtenidas usando una potencia de luz incidente de  $30 \text{ mW/cm}^2$ . Como puede verse

en la Figura 5 y la Tabla 1, la eficiencia de conversión más alta de los DSSCs es de 0,0107% medida en las celdas expuestas a una luz con longitud de onda de 470 nm (azul), con un voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 0,374 V y una densidad de corriente de cortocircuito ( $J_{sc}$ ) de 0.0183  $\text{mA/cm}^2$ , y factor de llenado (FF) de 0.471. Por otro lado, la eficiencia de conversión de las DSSCs más baja se obtuvo al exponerlas a una luz con longitud de onda de 530 nm (verde), 0,0037%, con  $V_{oc}$  de 0.347 V y  $J_{sc}$  de 0.0064  $\text{mA/cm}^2$ , y FF de 0.498. Se puede observar en la Figura 5 que el extracto de cáscara de camote morado influye en la eficiencia de conversión fotoeléctrica de las DSSCs de acuerdo a la longitud de onda incidente, esto se relaciona también con la absorbancia de la luz observada en la Figura 1a. Los valores de voltaje son similares y en algunos casos superiores a lo reportado por otros autores; sin embargo, se debe trabajar en mejorar en la eficiencia [16,20,25].

TABLA I  
PARÁMETROS FOTOVOLTAICOS DE LAS DSSCs FABRICADAS IRRADIADAS CON LUZ CON UNA DENSIDAD DE POTENCIA DE  $30 \text{ mW/cm}^2$

Longitud de onda (nm)	$P_{max}$ (mW)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	FF	Eficiencia (%)
470	0.0129	0.374	0.0183	0.471	0.0107
505	0.0055	0.349	0.0083	0.478	0.0046
530	0.0044	0.347	0.0064	0.498	0.0037
590	0.0063	0.354	0.0090	0.497	0.0053
627	0.0067	0.354	0.0094	0.506	0.0056

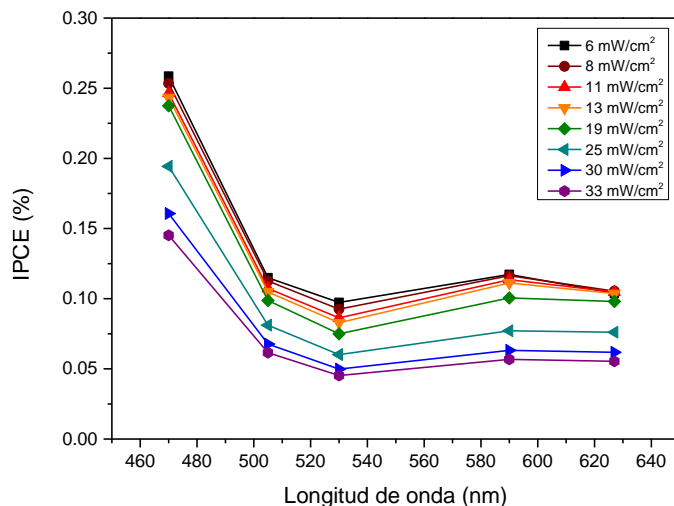


Fig. 6 Curvas IPCE para DSSCs sensibilizadas con extractos de cáscara de camote morado.

La Figura 6 muestra la eficiencia de conversión de fotones incidentes a electrones (IPCE) para un DSSC sensibilizado con extracto de cáscara de camote morado. Como se puede ver en la Figura 5, cuando la longitud de onda de la luz incidente es menor a 500 nm se logra una mayor

eficiencia de conversión de fotón a electrón. Además, para una longitud de onda de 470 nm, el  $IPCE_{max}$  de la celda solar es del 0.26 % con una potencia de luz incidente de 6 mW/cm<sup>2</sup>.

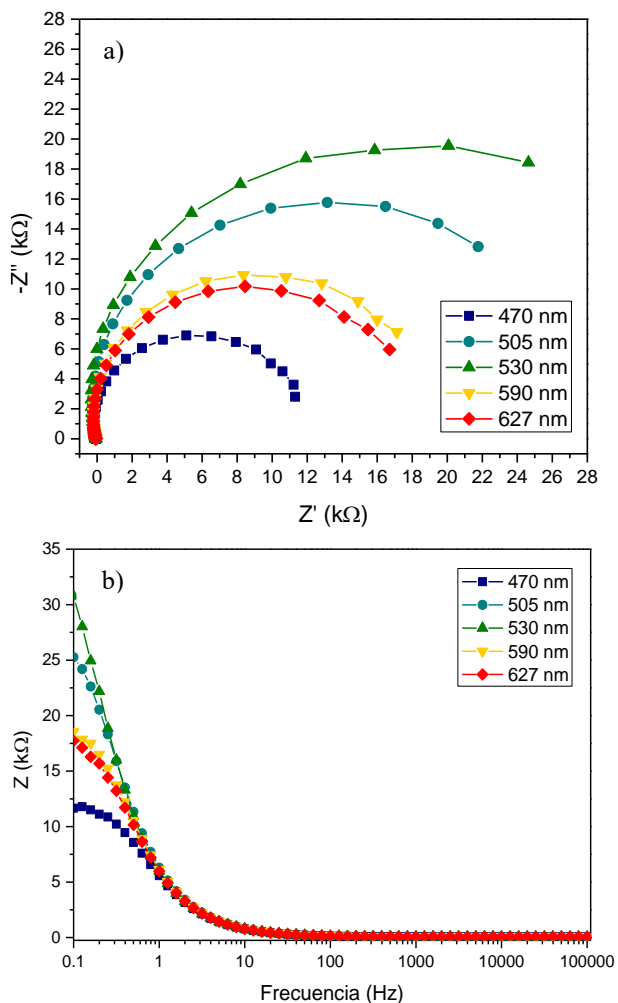


Fig. 7 a) Nyquist y b) diagramas de Bode de las DSSCs fabricadas.

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es un método efectivo para analizar el proceso de transporte/transferencia de electrones entre las interfaces en una DSSC. La recombinación de huecos de electrones es siempre un problema importante que afecta su rendimiento de las DSSCs. Los electrones se recombinan con los huecos creados en las moléculas de colorante excitadas cuando están en un semiconductor transparente o con los átomos del electrolito ionizado [29]. El semicírculo en las curvas de Nyquist se utiliza para medir el grado de resistencia a la recombinación de carga. Un radio grande del semicírculo indica baja resistencia a la recombinación de carga. Hay tres semicírculos que ocurren a frecuencia más alta, frecuencia intermedia y frecuencia baja y resultan de la resistencia interfacial en el contraelectrodo y el electrolito, la resistencia interfacial entre el fotoánodo y el electrolito, y la resistencia al

transporte de portadores [30]. La Figura 7 muestra los diagramas de Nyquist y Bode para las DSSCs fabricadas. Se observan semicírculos que ocurren en la región de frecuencia media. El semicírculo más grande implica la mayor resistencia, el cual corresponde a la respuesta a la exposición a una luz incidente de 530 nm (verde). El tamaño de estos semicírculos disminuye hasta las DSSCs con incidencia de luz con 470 nm (azul), el cual tiene la menor resistencia al flujo de cargas libres. Estos resultados son consecuentes con lo mostrado en la Figura 5, en donde con una luz incidente de 470 nm se obtuvo un mejor rendimiento de la DSSCs.

#### IV. CONCLUSIONES

Se logró obtener extracto de cáscara de camote morado y se comprobó su potencial uso colorantes sensibilizadores en DSSCs. Los colorantes fueron caracterizados mediante las técnicas de espectrofotometría FTIR y UV-Vis, obteniendo picos de absorción en los 390, 445 y 530 nm. Se comprobó la cristalinidad y pureza del TiO<sub>2</sub> en fase anatase y de las partículas de carbono obtenidas por la combustión de una vela. Se fabricaron DSSCs y se obtuvieron variables electroquímicas de  $V_{oc} = 0.374$  V,  $J_{sc} = 0.0183$  mA/cm<sup>2</sup>,  $FF = 0.471$  y una eficiencia de 0.0107% para cuando las celdas son irradiadas con luz de 470 nm. Los resultados de EIS confirman un buen desempeño electroquímico al mostrar una baja resistencia de flujo de cargas libres bajo esta longitud de onda. En este trabajo se resalta el uso de materiales que comúnmente son desechados porque no forman parte de la alimentación, pero que, sin embargo, poseen ciertas características que pueden ser aprovechadas para el desarrollo este tipo de tecnología. Es importante mencionar que se está trabajando en la optimización de algunos procesos como el de la extracción o el de impregnación del colorante para la obtención de mejores resultados en el futuro.

#### REFERENCIAS

- [1] Bose, B. K. "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 6-17, 2010.
- [2] Nazario-Naveda, R., Rojas-Flores, S., Juárez-Cortijo, L., Gallozzo-Cardenas, M., Díaz, F. N., Angelats-Silva, L., & Benites, S. M. "Effect of x on the Electrochemical Performance of Two-Layered Cathode Materials xLi<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub>-(1-x) LiNiO. 5MnO. 5O<sub>2</sub>". *Batteries*, vol. 8, no. 7, pp. 63, 2022.
- [3] Rojas-Flores, S., De La Cruz-Noriega, M., Cabanillas-Chirinos, L., Nazario-Naveda, R., Gallozzo-Cardenas, M., Díaz, F., & Murga-Torres, E. "Potential Use of Coriander Waste as Fuel for the Generation of Electric Power". *Sustainability*, vol. 15, no. 2, pp. 896, 2023.
- [4] Ghosh, S.; Bhattacharjee, U.; Bhowmik, S.; Martha, D.; Surendra, K. A "Review on High-Capacity and High-Voltage Cathodes for Next-Generation Lithium-ion Batteries". *J. Energy Power Technol*, vol. 4, pp. 1-59, 2022.
- [5] Guzmán-Hernández, T.; Araya-Rodríguez, F.; Castro-Badilla, G.; Obando-Ulloa, J. M. "Uso de La Energía Solar En Sistemas de Producción Agropecuaria: Producción Más Limpia y Eficiencia Energética". *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 29, no. 8, pp. 46-56, 2016.
- [6] Rangel, D., Gallegos, J. C., Vargas, S., García, F., & Rodríguez, R. "Optimized dye-sensitized solar cells: a comparative study with different

- dyes, mordants and construction parameters". *Results in Physics*, vol. 12, pp. 2026-2037, 2019.
- [7] Castillo-Robles, J. A.; Rocha-Rangel, E.; Ramírez-De-león, J. A.; Caballero-Rico, F. C.; Armendáriz-Mireles, E. N. "Advances on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) Nanostructures and Natural Colorants: A Review". *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 11, pp. 288, 2021.
- [8] Salimian, J., Osfouri, S., Azin, R., & Jalali, T. "Impacts of paste preparation methods on the porous TiO<sub>2</sub> nanostructure properties and naturally dye-sensitized solar cells performance". *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, pp. 4816-4833, 2022.
- [9] Hernández-Martínez, A. R.; Estevez, M.; Vargas, S.; Quintanilla, F.; Rodríguez, R. "Natural Pigment-Based Dye-Sensitized Solar Cells". *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 38-47, 2012.
- [10] Adhikary, D., Forsyth, J. A., Murch, S. J., & Deyholos, M. K. "Impact of betacyanins on responses to ultraviolet radiation in *Amaranthus tricolor* L.". *Journal of Plant Interactions*, vol. 15, no. 1, pp. 117-126, 2020.
- [11] Amogne, N. Y., Ayele, D. W., & Tsigie, Y. A. "Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dye sensitized solar cell". *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, pp. 1-16, 2020.
- [12] Patni, N., G. Pillai, S., & Sharma, P. "Effect of using betalain, anthocyanin and chlorophyll dyes together as a sensitizer on enhancing the efficiency of dye-sensitized solar cell". *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 13, pp. 10846-10859, 2020.
- [13] Dumbravă, A., Enache, I., Oprea, C. I., Georgescu, A., & Gîrțu, M. A. "Toward a more efficient utilisation of betalains as pigments for dye-sensitized solar cells". *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, vol. 7, no. 1, 2012.
- [14] Golshan, M., Osfouri, S., Azin, R., Jalali, T., & Moheimani, N. R. "Co-sensitization of natural and low-cost dyes for efficient panchromatic light-harvesting using dye-sensitized solar cells". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 417, pp. 113345, 2021.
- [15] Calogero, G., Bartolotta, A., Di Marco, G., Di Carlo, A., & Bonaccorso, F. "Vegetable-based dye-sensitized solar cells". *Chemical Society Reviews*, vol. 44, no. 10, pp. 3244-3294, 2015.
- [16] Sukardi, S.; Kiswaya, S. M.; Pranowo, D. "Antosianin Ekstrak Ubi Jalar Ungu Kering Untuk Donor Elektron Sel Surya Pewarna Tersensitisasi (SSPT)". *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, vol. 7, no. 3, pp. 133-142, 2018.
- [17] Ramelan, A. H., Wahyuningsih, S., Saputro, S., Supriyanto, E., & Hanif, Q. A. "TiO<sub>2</sub> nanostructure synthesized by sol-gel for dye sensitized solar cells as renewable energy source". En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 176, no. 1, pp. 012013, 2017.
- [18] Nadia, N.; Mursal, M.; Jalil, Z. "Optical Characterization of Purple Sweet Potato (*Ipomoea Batatas*) and Carrot (*Daucus Carota* L.) Extracts for Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) Application". *Journal of Aceh Physics Society*, vol. 11, no 3, pp. 80-84, 2022.
- [19] Supriyanto, A.; Cari, C.; Khairuddin; Suciarmoko, P. M.; Kurniawan, D.; Septiawan, T. Y. "The Fabrication of DSSC TiO<sub>2</sub> Transparent Thin Layer with Natural Dye Sweet Potato (*Ipomoea Batatas* L.)". *J Phys Conf Ser*, vol. 1153, no. 1, pp. 012098, 2019.
- [20] Kimia, J.; Matematika, F.; Ilmu, D.; Alam, P.; Oktavia, U.; Sanjaya, H. "Making dye sensitized solar cell (dssc) using gmr as substrate and purple sweet potato extract (*ipomoea batatas* l) as ad dye sensitizer. *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, vol. 8, no. 1, pp. 58-66, 2019.
- [21] Ruttarattanamongkol, K., Chittrakorn, S., Weerawatanakorn, M., & Dangpium, N. "Effect of drying conditions on properties, pigments and antioxidant activity retentions of pretreated orange and purple-fleshed sweet potato flours". *Journal of Food Science and Technology*, vol. 53, pp. 1811-1822, 2016.
- [22] Chen, C. C., Lin, C., Chen, M. H., & Chiang, P. Y. "Stability and quality of anthocyanin in purple sweet potato extracts". *Foods*, vol. 8, no. 9, pp. 393, 2019.
- [23] Cari, C., Khairuddin, K., Septiawan, T. Y., Suciarmoko, P. M., Kurniawan, D., & Supriyanto, A. "The preparation of natural dye for dye-sensitized solar cell (DSSC)". In *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, vol. 2014, no. 1, 2018.
- [24] Li, A., Xiao, R., He, S., An, X., He, Y., Wang, C., ... & He, J. "Research advances of purple sweet potato anthocyanins: extraction, identification, stability, bioactivity, application, and biotransformation". *Molecules*, vol. 24, no. 21, pp. 3816, 2019.
- [25] Nadhirah, Y., Kusumanto, R. D., & Hasan, A. "Increasing Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Originating from Yellow Sweet Potato Extract as Dye Sensitizer: Effect of Acetic Acid, Polyethylene Glycol, and Polyvinyl Alcohol as TiO<sub>2</sub> binders". *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 23, no. 11, pp. 403-408, 2020.
- [26] Karthick, S. N.; Hemalatha, K. V.; Justin Raj, C.; Subramania, A.; Kim, H. J. "Preparation of TiO<sub>2</sub> Paste Using Poly (Vinylpyrrolidone) for Dye Sensitized Solar Cells". *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 23, pp. 7018-7021, 2012.
- [27] Ito, S.; Chen, P.; Comte, P.; Nazeeruddin, M. K.; Liska, P.; Péchy, P.; Grätzel, M. "Fabrication of Screen-Printing Pastes from TiO<sub>2</sub> Powders for Dye-Sensitized Solar Cells". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 15, no. 7, pp. 603-612, 2007.
- [28] Hossain, M. A.; Islam, S. "Preparation of Carbon Nanoparticles from Candle and Their Characterization by Advanced Spectroscopic Methods". *Dhaka University Journal of Science*, pp. 212-217, 2022.
- [29] Fabregat-Santiago, F.; Barea, E. M.; Bisquert, J.; Mor, G. K.; Shankar, K.; Grimes, C. A. "High Carrier Density and Capacitance in TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays Induced by Electrochemical Doping". *J Am Chem Soc*, vol. 130, no. 34, pp. 11312-11316, 2008.
- [30] Shah, S.; Buraidah, M. H.; Teo, L. P.; Careem, M. A.; Arof, A. K. "Dye-Sensitized Solar Cells with Sequentially Deposited Anthocyanin and Chlorophyll Dye as Sensitizers". *Opt Quantum Electron*, vol. 48, no. 3, pp. 1-8, 2016.