

¿Cómo Minimizar los Efectos del Sustrato para la Determinación de las Propiedades Electroquímicas de Semiconductores Soportados de Interés en Fotocatálisis y Fotoelectrocatalisis?

Sandra N. Piedra Lorenzana ¹, Rosa M. Luna-Sánchez ¹, Fabiola S. Sosa-Rodríguez ³, Elim Albiter ⁴, Jorge Vazquez-Arenas ^{2,*}

¹ Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Ciudad de México, 02128, México.

² Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Col. La Laguna Ticomán, Ciudad de México, 07340, México.

³ Área de Investigación en Crecimiento y Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Ciudad de México, 02128, México.

⁴ Laboratorio de Catálisis y Materiales, Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE, Zacatenco, Ciudad de México, 07738, México.

* Autor de correspondencia: jgvazquez@ipn.mx Tel. 5729-6000, Ext. 52602

Contaminación del agua, el suelo y el aire (Procesos fisicoquímicos)

Recibido: 20 de junio de 2026

Aceptado: 17 de agosto de 2026

Publicado: 2 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.728>

Resumen: La actividad de un fotocatalizador suele evaluarse cuando éste se encuentra depositado sobre un sustrato. Sin embargo, materiales comúnmente utilizados como FTO o ITO también presentan propiedades semiconductoras y pueden contribuir a la respuesta fotoelectroquímica medida. Esto dificulta determinar las propiedades intrínsecas del material fotoactivo. Además, un fotoelectrodo eficiente requiere alcanzar un equilibrio entre la cantidad de semiconductor y una adecuada conductividad eléctrica que favorezca la separación y el transporte de las cargas fotogeneradas. En este trabajo se propone una metodología basada en electrodos de pasta de carbono y en la teoría de percolación eléctrica para minimizar la contribución del sustrato. Como sistema modelo se utilizó Ag_2S como semiconductor fotoactivo, grafito como material conductor y aceite de silicón como aglomerante. El grafito genera una red conductora que facilita la extracción y el transporte de los electrones fotogenerados en el Ag_2S , favoreciendo su separación de los huecos y disminuyendo su recombinación. La composición 90:10 presentó mayor fotocorriente bajo iluminación y permitió una mejor estimación del potencial de banda plana del Ag_2S que la proporción 80:10. Este comportamiento se atribuyó a una mayor presencia de fase fotoactiva y a una transferencia más eficiente de los electrones hacia la red conductora de carbono. El aglomerante, por su parte, favoreció el contacto entre las partículas y la compactación del electrodo. La principal aportación del estudio es demostrar que la percolación eléctrica puede emplearse como estrategia metodológica para caracterizar semiconductores fotoactivos minimizando la interferencia del sustrato. Aunque la composición deberá optimizarse para cada material, esta aproximación abre nuevas posibilidades para evaluar de manera más representativa sus propiedades fotoelectroquímicas intrínsecas.

Palabras clave: Ag_2S , semiconductor tipo *p*, electrodo de pasta de carbono, percolación eléctrica, potencial de banda plana

How to Neglect Substrate Effects to Account for the Electrochemical Properties of Supported Semiconductors of Interest in Photocatalysis and Photoelectrocatalysis?

Abstract: The activity of a photocatalyst is commonly evaluated after its deposition onto a substrate. However, widely used substrates such as FTO and ITO also exhibit semiconducting properties and may contribute to the measured photoelectrochemical response, making it difficult to determine the intrinsic properties of the photoactive material. Furthermore, an efficient photoelectrode requires an appropriate balance between semiconductor content and electrical conductivity to promote the effective separation and transport of photogenerated charge carriers. In this work, a methodology based on carbon paste electrodes and electrical percolation theory is proposed to minimize the contribution of the substrate. Ag_2S was employed as a model photoactive semiconductor, with graphite serving as the conductive component and silicone oil as the binder. The graphite forms a conductive percolation network that facilitates the extraction and transport of photogenerated electrons from Ag_2S , thereby promoting electron-hole separation and suppressing charge recombination. The 90:10 composition exhibited a higher photocurrent under illumination and enabled a more reliable estimation of the Ag_2S flat-band potential than the 80:10 composition. This behavior was attributed to the higher content of the photoactive phase and more efficient electron transfer through the conductive carbon network. Meanwhile, the binder improved interparticle contact and electrode compactness. The main contribution of this study is to demonstrate that electrical percolation can be employed as a methodological strategy for characterizing photoactive semiconductors while minimizing substrate interference. Although the optimal composition must be tailored to the physicochemical and electrical properties of each material, this approach provides a promising platform for obtaining a more representative assessment of the intrinsic photoelectrochemical properties of semiconductor materials.

Keywords: Ag_2S , *p*-type semiconductor, carbon paste electrode, electrical percolation, flat band potential

Introducción

Desde hace varios años, los materiales semiconductores han generado un gran interés en el campo de la fotocatalisis debido a que poseen una estructura electrónica apropiada para producir portadores de carga (hueco y electrón) cuando son iluminados con radiación similar a la del espectro solar (UV-Vis). Por lo general, los huecos son formados en la banda de valencia (BV) cuando un electrón es fotoeyectado hacia la banda de conducción (BC) debido a la absorción de un fotón con energía igual o similar a la brecha energética del semiconductor. Hoy en día, el diseño de nuevos materiales semiconductores, y la formación de heterouniones, y efectos plasmónicos con ciertos metales para mitigar los procesos de recombinación que surgen entre el hueco y el electrón son las principales problemáticas abordadas a nivel de fotocatalisis. Sin embargo, una menor cantidad de investigación se ha orientado a optimizar el funcionamiento de las fases fotocatalíticas existentes, así como a entender los mecanismos de reacción que controlan la eficiencia de separación de los transportadores de carga, para promover el desarrollo de una reacción redox o electroquímica. De manera particular, pocos estudios evalúan la determinación precisa de la estructura energética de bandas del semiconductor o de las heterouniones, lo cual controla la capacidad de trabajo eléctrico (eV) que pueden desarrollar tanto los huecos y electrones en las BV y BC, respectivamente. Por lo cual, no se puede precisar si una reacción de transferencia de carga de interés (i.e. formación de radicales hidroxilo en la BV, o formación de H₂ en la banda de conducción) puede ocurrir debido a la falta de alineamiento preciso de las bandas. Para analizar la estructura de bandas, por lo general se emplea la técnica de Mott-Schottky donde se obtiene la capacitancia del espacio carga mediante un barrido de potencial en la “región capacitiva”. La ecuación que relaciona la capacitancia (F/cm²) con el potencial aplicado se describe en la Ecuación 1 (Bisquert, 2002; Gerischer, 1990):

$$C_{SC}^{-2} = \frac{2N_A V}{\epsilon_0 \epsilon_r F N} \left(E - E_{FB} - \frac{RT}{F} \right) \quad (1)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío (8.85×10^{-14} F/cm), ϵ_r es la permitividad relativa (constante dieléctrica) del semiconductor, F es la constante de Faraday (96 485.5 C/mol), N es la densidad de dopantes (donadores ND para tipo n y aceptores NA para tipo p, cm⁻³), NA es el número de Avogadro, E_{FB} es el potencial de banda plana (V), R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol K), T es la temperatura (K), y E es el potencial aplicado vs una referencia (V). Una gráfica de C_{SC}^{-2} vs $(E - E_{FB})$ permite determinar el potencial de banda plana, la cual presenta una pendiente positiva para el caso de semiconductores tipo n ($N = ND$), y una pendiente negativa para el caso de semiconductores tipo p ($N = NA$). Bajo esta consideración, E_{FB} se puede aproximar al valor del potencial de la BC o de la BV para un semiconductor tipo n o p, respectivamente. De esta forma se determina el valor de potencial de la banda faltante usando el valor de la banda prohibida determinada mediante espectroscopía de reflectancia difusa. La validez de la ec. de Mott-Schottky se basa en considerar que la capacitancia del espacio carga es significativamente más pequeña que la capacitancia de la doble capa, lo cual pudiera ocurrir en frecuencias relativamente altas arriba de los kHz (asumiendo una capacitancia estacionaria de Helmholtz (Acevedo-Pena *et al.*, 2013; Carrera-Crespo *et al.*, 2021; Palomares-Reyna *et al.*, 2023). Para la aplicación de la técnica de Mott-Schottky, típicamente se deposita el material semiconductor en polvo sobre vidrio conductor como óxido de estaño dopado con flúor (FTO) u óxido de indio y estaño (ITO), que no absorben la mayor parte de la radiación UV-Vis que incide sobre ellos si son iluminados por una parte posterior. Sin embargo, un estudio analizando la actividad de la heterounión formada entre BiVO₄/FTO ha concluido que el FTO no actúa como un colector de corriente o sustrato inerte que no contribuye a la fotoactividad cuando es irradiado debido a diferencias en la fotocorriente cuando es iluminado por la parte posterior o frontal de la interface BiVO₄/FTO, por lo que debe ser considerado también como parte de los componentes activos del fotocatalizador (Carrera-Crespo *et al.*, 2021). Bajo esta idea, no es posible medir de manera precisa la estructura energética de bandas, o bien la respuesta fotoelectroquímica sin tener la contribución del sustrato (e.g. ITO, FTO). Desafortunadamente, se requiere medir la respuesta electroquímica de la interfase semiconductor/sustrato sujeta a un proceso de conducción eléctrica para poder estimar este tipo de propiedades. En este estudio, se presenta una nueva metodología basada en la construcción de un composite de electrodo de pasta de carbono basada en material semiconductor, aceite de silicón como aglomerante, y grafito como conductor eléctrico, variados en diferentes composiciones para relajar principalmente la respuesta del semiconductor, sin la contribución de alguna determinada fase presentando fotoactividad. Vale la pena resaltar que ni el aceite de silicón ni el grafito presentan actividad fotocatalítica, por lo que desempeñan papeles diferentes al FTO o ITO. Sulfuro de plata es utilizado como semiconductor, debido a su destacada importancia en el desarrollo de aplicaciones fotocatalíticas sustentables.

La incorporación de un semiconductor fotoactivo en un electrodo compuesto de pasta de carbono, constituido por grafito como fase conductora y aceite de silicón como aglomerante, permitirá establecer una red de percolación eléctrica capaz de extraer y transportar eficientemente los electrones fotogenerados, minimizando simultáneamente la contribución fotoelectroquímica asociada a sustratos semiconductores convencionales como FTO e ITO. En consecuencia, la optimización de la composición semiconductor/grafito/aglomerante permitirá obtener una respuesta fotoelectroquímica dominada por el semiconductor y, por tanto, una estimación más representativa de sus propiedades electrónicas intrínsecas, particularmente del potencial de banda plana y de la dinámica de separación y transporte de los portadores de carga. Por lo cual, el desarrollo del presente estudio es desarrollar y evaluar una metodología electroquímica basada en electrodos compuestos de pasta de carbono y en la teoría de percolación eléctrica para caracterizar las propiedades fotoelectroquímicas intrínsecas de materiales semiconductores, minimizando la contribución de sustratos fotoactivos convencionales, utilizando Ag_2S como semiconductor modelo. De esta forma, la principal contribución del trabajo no radica en desarrollar un nuevo semiconductor, sino en proponer una forma diferente de integrar y caracterizar electroquímicamente semiconductores fotoactivos ó fotoelectroactivos.

Materiales y Métodos

Se prepararon electrodos de pasta de carbono, con un 10 y 20 wt.% en total de polvo de grafito (G, Alfa Aesar, 2-15 micras, Jonhson Matthey 99.9995%) como fase conductora y aceite de silicón (AS, Sigma Aldrich, $\rho = 0.96 \text{ g/mL}$, $\nu = 200 \text{ cS}$) como aglomerante; y respectivamente 90 y 80 wt.% de sulfuro de plata, Ag_2S (Sigma Aldrich), como especie electroactiva. El polvo de grafito y el aceite de silicón siempre se adicionaron en wt.% iguales. Se adicionó el sulfuro de plata en un mortero de Ágata y se adicionó paulatinamente el polvo de grafito. Se incorporó lentamente el aceite aglomerante hasta formar una pasta homogénea y consistente; posteriormente, se introdujo el composite en una jeringa. Por otro lado, se preparó una solución 0.5 M de sulfato de sodio (J.T. Meyer), como electrolito. El estudio se desarrolló en una celda electroquímica de tres electrodos: composite de pasta de carbono (electrodo de trabajo), un contraelectrodo de Ti-Pd y el electrodo de referencia de Ag/AgCl (KCl saturado, 0.197 V vs SHE), los cuales fueron conectados a un potenciostato Biologic VMP2. Los estudios con luz fueron realizados utilizando un LED de 50 W de potencia presentando un pico con un máximo de irradiación a 365 nm. La adquisición de datos fue a través de un software Ec-Lab V11.50. Las caracterizaciones electroquímicas se realizaron al menos por duplicado, aunque dentro del presente estudio solo se reportan las respuestas electroquímicas típicas.

El reactivo sulfuro de plata, Ag_2S , fue caracterizado por difracción de rayos X, utilizando un equipo Philips X'Pert pro MPD, así como por microscopía electrónica de barrido utilizando un equipo SUPRA 55 VP acoplado a un detector de rayos X por energía dispersiva, EDX.

Resultados y Discusión

La caracterización del sulfuro de plata comercial (recibido) se presenta en la Figura 1, de manera complementaria para confirmar la existencia de la fase y su morfología. De manera particular, la Figura 1a presenta el difractograma (configuración Bragg-Brentano) obtenido para el material recibido como sulfuro de plata, el cual de acuerdo con este análisis se confirma la obtención de su fase, asociada con el indexado de la carta PDF 00-024-0715 y los planos (110), ($\bar{1}13$), ($\bar{1}22$), (120), ($\bar{1}05$), (031) (Yuan *et al.*, 2019); otros picos menores se pueden asociar con otras fases de plata, o con impurezas en nivel de trazas. Por otra parte, el análisis morfológico que se presenta en la Figura 1b con una micrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido indica que el material comercial se encuentra integrado por partículas de tamaño menor a una micra, que a pesar de que se aglomeran de manera importante, presentan una dispersión y morfología adecuada para realizar procesos de catálisis heterogénea. El espectro de análisis elemental generado por espectroscopía de rayos X de dispersión de energía confirma que el material comercial es sulfuro de plata, con un nivel de impurezas fuera del alcance de detección de la técnica.

La fabricación del composite fue establecida a porcentajes aproximadamente similares en peso para el aceite de silicón y grafito, para evitar tener una variable adicional a controlar. De igual forma, los porcentajes de material activo (80 y 90 wt. %) se establecieron de acuerdo a los límites de percolación eléctrica establecidos para otros sistemas electroquímicos funcionando también con materiales pobres en conducción eléctrica, o requiriendo un gran transporte iónico y eléctrico (Guzmán *et al.*, 2017; Manzano-Zavala *et al.*, 2024). De igual forma, lo ideal de establecer el composite es maximizar la cantidad de material activo, evitando que la mezcla pierda integridad mecánica durante su uso, o

presente una baja conductividad eléctrica o iónica debido a la ausencia de suficiente carbón conductor, que es un requerimiento en la mayor parte de los sistemas electroquímicos.

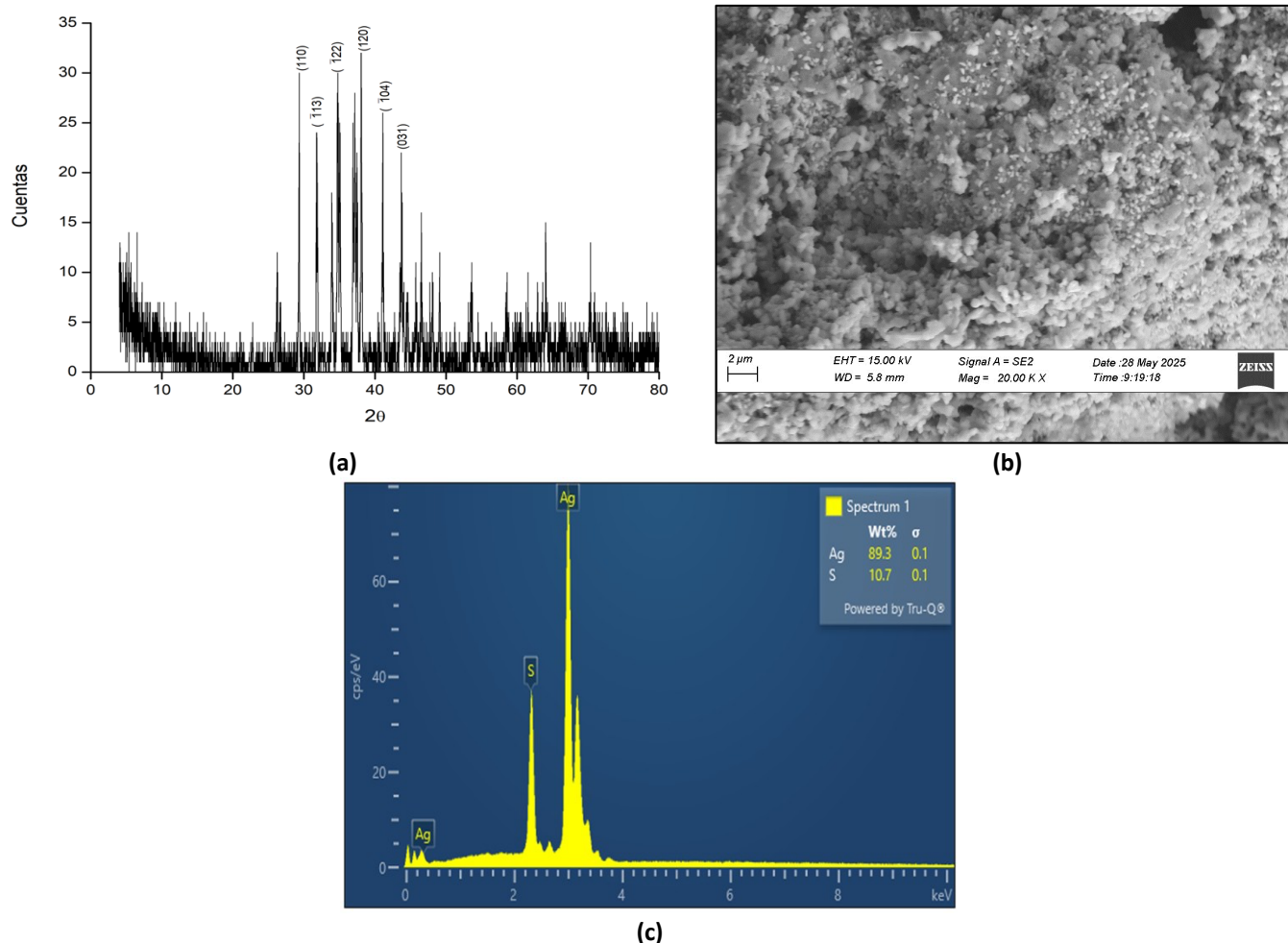


Figura 1. a) Difractograma obtenido bajo una configuración Bragg-Brentano, b) micrografía colectada con un microscopio electrónico de barrido, y c) espectro de análisis elemental generado por espectroscopía de rayos X de dispersión de energía del material comercial recibido como sulfuro de plata (Ag₂S).

La Figura 2a muestra las gráficas a potencial de circuito abierto (OCP) durante 15 min de oscuridad, y 15 min de radiación para los composites integrados de 80 y 90 wt.% de Ag₂S. Se puede observar que durante la oscuridad, prácticamente el OCP no varía de manera significativa debido a que no existe movimiento de cargas dentro del material semiconductor o en la interfase formada con la solución. Cuando se hace incidir la radiación, el potencial de ambos composites se mueve a valores menos positivos, debido a que la iluminación genera una transición electrónica de los electrones en la banda de valencia hacia la banda de conducción (pares electrón-hueco). Particularmente, el cambio a valores menos positivos de OCP en el cambio de oscuridad a luz es mayor para la muestra conteniendo 90:10 wt.% Ag₂S:G+AS, indicando que hay una mayor cantidad de electrones acumulados en la banda de conducción relacionado con una mejor separación de los portadores de carga. Aunque ambas composiciones alcanzan una buena fotoestabilidad después de 5 min, valores de OCP más positivos que se presentan para el composite 80:20 sugieren una mayor recombinación en comparación con 90:10 donde una mayor cantidad de material activo y suficiente carbón conductor permite formar una mejor red de percolación alrededor de las partículas de Ag₂S, para mejorar la transferencia de los electrones fotogenerados. Esta información se confirma con las pruebas de fotocorriente que se muestran, donde se alcanza una mayor fotocorriente para el composite compuesto de 90:10 (Figura 2b), en comparación del fabricado con una relación 80:20. Este comportamiento sugiere que la primera composición es más efectiva para desarrollar un proceso fotoelectrocatalítico donde se requiere un material semiconductor con baja conductividad electrónica, y a su vez un material como grafito conductor para transportar la carga fotogenerada, una vez que la reacción fotocatalítica o fotoelectrocatalítica ha ocurrido, y se requiere una eficiente separación de cargas.

De igual forma, al presentar mayor contenido de sulfuro de plata sería más adecuada para caracterizar sus propiedades electroquímicas, incluyendo el potencial de banda plana. También son notorios otros dos rasgos peculiares de la caracterización de semiconductores tipo p sometidos a radiación, el primero es un mayor incremento de la fotocorriente cuando son iluminados debido a que existe una separación eficiente de cargas promovida por el proceso de fotoeyección, siendo los electrones los portadores minoritarios y los que se mueven hacia la interfase semiconductor/solución, mientras que los huecos (mayoritarios) migran hacia el seno del material. El fotoelectrodo con una composición 90:10 genera una mayor fotocorriente que a 80:20 bajo condiciones de irradiación, confirmando un mejor desempeño debido al mayor contenido de Ag_2S , y una composición adecuada de carbón y aglomerante que permiten establecer una red de percolación eléctrica, manteniendo la integridad mecánica con el uso, sin sacrificar sitios de fotoactividad.

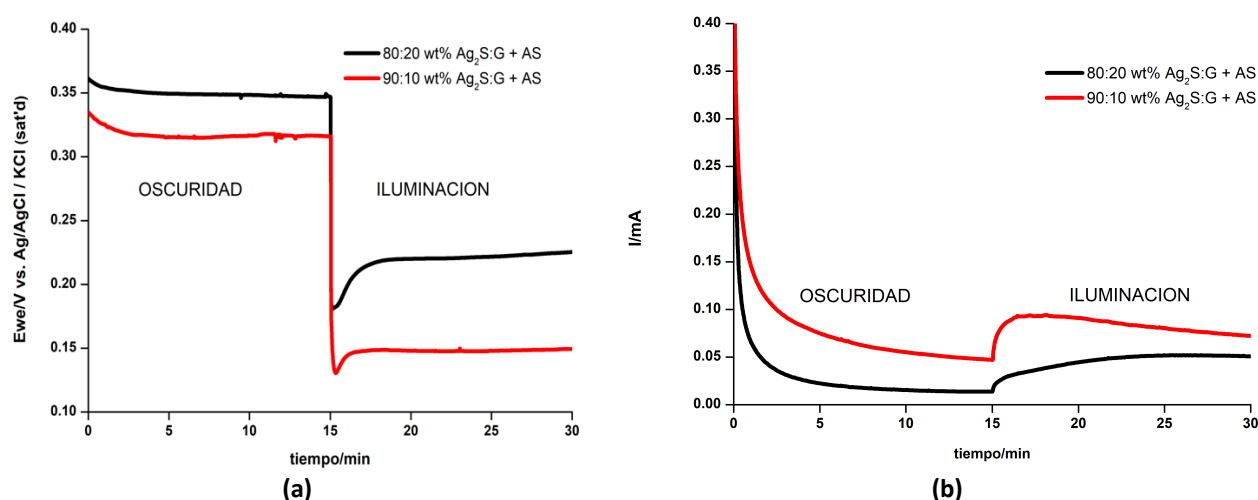


Figura 2. a) Gráficas de potencial de circuito abierto, y b) Gráficas de fotocorriente obtenidas empleando una celda electroquímica, a dos composiciones diferentes del composite empleado como electrodo de trabajo: 80 y 90 wt.% Ag_2S (etiquetado en las gráficas).

La Figura 3 muestra los análisis de Mott-Schottky realizados con los dos composites de Ag_2S a diferentes frecuencias en rango típico de análisis de este tipo de experimentos, con un barrido de potencial en la región de -0.7 a 0.4 V vs SHE. En el caso de las evaluaciones realizadas con una composición de 80:20, se puede observar que las gráficas presentan una pendiente negativa y abrupta asociada con la relajación del espacio carga, y donde típicamente se realiza la determinación del potencial de banda plana. Estudios en la literatura realizados con nanoestructuras de Ag_2S revelan valores de banda plana en el rango de -0.28 a -0.41 V vs Ag/AgCl o -0.083 a -0.213 V (Yadav *et al.*, 2021), los cuales se encuentran a potenciales mucho más positivos a los que se puedan determinar de las figuras 2a o 2b aproximadamente alrededor de -0.65 V vs SHE. Lo anterior pudiera indicar que quizás un menor contenido de Ag_2S con respecto al grafito y el aceite de silicón, pudiera disminuir su contribución en las mediciones de las propiedades como el potencial de banda plana. Cuando este mismo análisis se considera para la composición de 90:10, donde se incrementa considerablemente la cantidad de material activo, frecuencias en el rango de 1.300 a 4.251 kHz (Figura 3c), no se puede determinar una extrapolación del potencial de banda plana, lo cual pudiera deberse a que el sulfuro de plata presenta una mayor conducción eléctrica con respecto a los semiconductores que típicamente se consideran en fotocatalisis (e.g. TiO_2 , ZnO , Cu_2O , BiVO_4 , BiFeO_3 , Bi_2O_3). Por lo cual, su espacio carga se relaja a valores de frecuencia por encima de 1.3 kHz, como se describe en la Figura 3d. De esta figura, claramente se observan las pendientes negativas asociadas con el carácter semiconductor tipo p del Ag_2S , y debido al incremento en el contenido de material activo se obtienen potenciales de banda plana alrededor de 0 V vs SHE. Este valor es en varios casos cientos de mV más positivos que aquellos reportados para Ag_2S considerando mezclas y heterouniones con otros materiales (Dong *et al.*, 2020; Rajbhandari *et al.*, 2011; Yadav *et al.*, 2021). Lo anterior indica que a pesar de que el sulfuro de plata dependa del tipo de síntesis, cristalinidad, pH de la solución, tipo de mezcla, propiedades texturales, entre otros factores; la metodología de su evaluación del potencial de banda plana y valores de fotocorriente hoy en día considera contribuciones importantes del sustrato, que por lo general son ignoradas, sobrestimando en muchos casos el papel que desempeña la fase semiconductor principal en los procesos fotocatalíticos o fotoelectrocatalíticos.

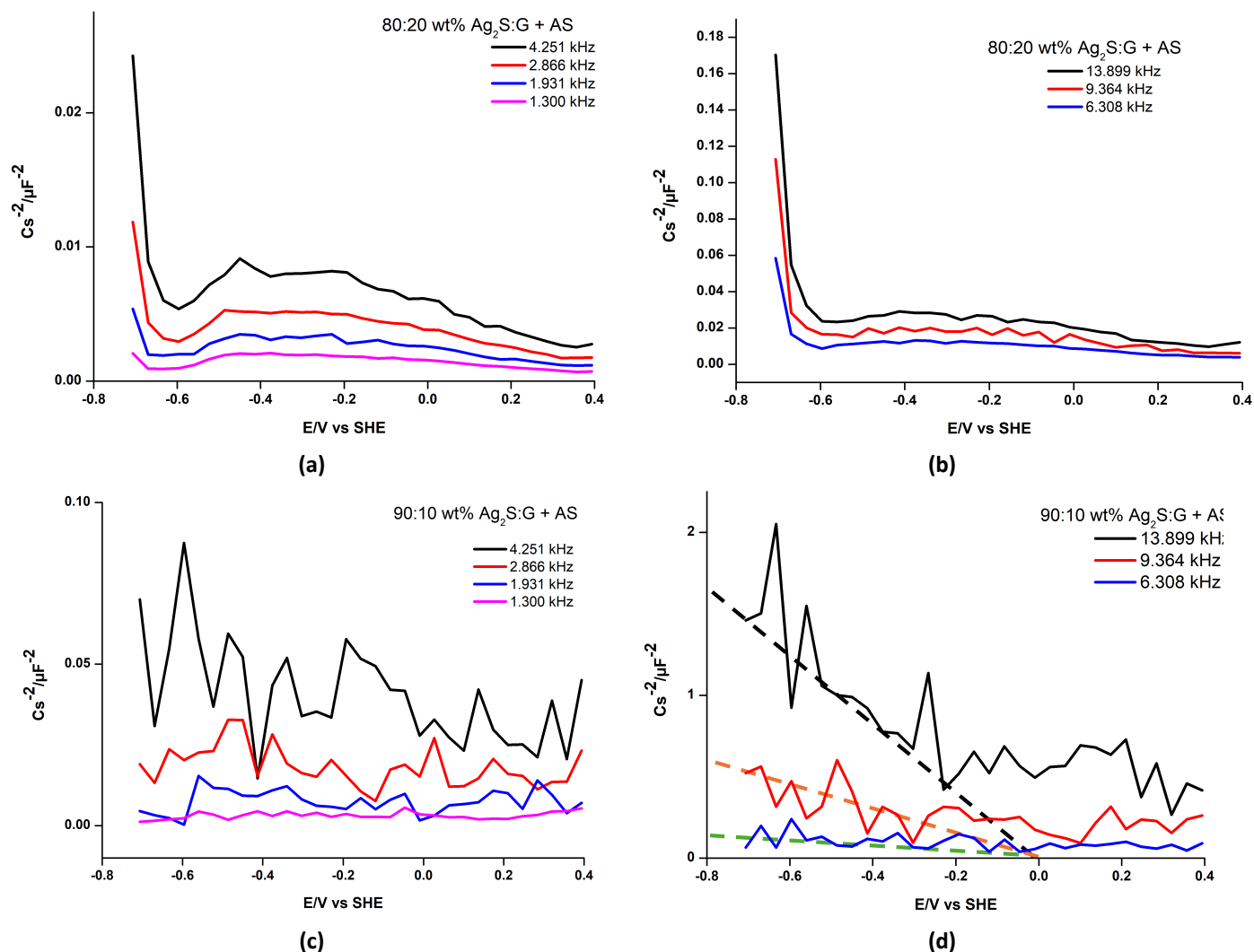


Figura 3. Análisis de Mott-Schottky realizado a a dos composiciones diferentes del composite empleado como electrodo de trabajo: 80 y 90 wt.% Ag_2S , y diferentes frecuencias (etiquetado en las gráficas).

La comparación entre los composites 80:20 y 90:10 muestra que la composición del electrodo controla de manera importante la respuesta fotoelectroquímica del Ag_2S . La formulación 90:10 permitió maximizar la cantidad de material fotoactivo sin perder la continuidad de la red conductora de grafito, alcanzando así un mejor balance entre actividad, transporte electrónico e integridad mecánica. Esta condición favoreció una mayor separación de los portadores de carga y redujo la recombinación electrón–hueco, lo que se reflejó en un desplazamiento más pronunciado del potencial de circuito abierto bajo iluminación y en una mayor fotocorriente respecto al composite 80:20. Este comportamiento también influyó en la determinación del potencial de banda plana. En el composite 80:20, la menor proporción de Ag_2S y la mayor contribución relativa del grafito y del aglomerante generaron una respuesta más aparente, con valores de E_{FB} considerablemente más negativos. En cambio, la composición 90:10 permitió obtener pendientes Mott–Schottky características de un semiconductor tipo n y estimar un potencial de banda plana cercano a 0 V vs SHE. Aunque este valor todavía puede depender de factores como pH, frecuencia, cristalinidad, tamaño de partícula y composición del electrolito, la mayor fracción de Ag_2S reduce la influencia de los componentes no fotoactivos del composite. En conjunto, los resultados indican que la composición 90:10 se encuentra cercana a un régimen favorable de percolación eléctrica, en el que se conserva suficiente carbón conductor para transportar los electrones fotogenerados, mientras se maximiza la contribución del semiconductor. Por ello, esta formulación no solo mejora la fotocorriente, sino que también permite una estimación más representativa de las propiedades fotoelectroquímicas del Ag_2S , reduciendo la interferencia asociada al uso de sustratos semiconductores convencionales como FTO o ITO.

Conclusiones

En este estudio se propone una nueva metodología basada en la construcción de electrodos de pasta de carbono con Ag_2S , aceite de silicón como aglomerante y grafito como carbón conductor, para evaluar propiedades electroquímicas como la fotocorriente y el potencial de banda plana, de relevancia actual en el campo de la fotocatalisis y la fotoelectrocatalisis. Se ha encontrado que en efecto los sustratos donde típicamente se soportan las fases activas semiconductoras tienen una contribución importante en definir la actividad fotocatalítica. Considerando dos composites de 80:20 y 90:10 (Ag_2S : aglomerante + carbón conductor) se encontró que aunque las composiciones no se han optimizado aún, la proporción de 90:10 está muy cerca del límite de percolación eléctrica donde es posible maximizar la cantidad de material semiconductor integrando el aglomerante que disminuye las resistencias eléctricas a través de un proceso de sinterización, y carbón conductor ya que resulta inefectivo que la carga electrónica viaje de manera efectiva a través de la fase semiconductor de Ag_2S , generando de esta forma un proceso de recombinación entre hueco y electrón. Así, esta composición permite obtener un potencial de banda plana alrededor de 0 V vs SHE, el cual se encuentra a potenciales más positivos que los típicamente reportados en la literatura usando técnicas electroquímicas (i.e. Mott-Schottky) similares de medición, pero empleando sustratos como colectores de corriente, los cuales también pudieran ser influenciados por otras condiciones en el sistema electroquímico de medición (pH, método de síntesis del material, solución, entre otros). Este estudio abre la posibilidad a realizar evaluaciones más precisas y con un menor grado de carácter “aparente” de la fotocorriente, y propiedades semiconductoras de interés en las áreas de fotocatalisis y fotoelectrocatalisis. Dentro de las limitaciones que se ubicaron durante el desarrollo de este estudio se ubican la selección adecuada del carbón conductor, ya que existen una gran cantidad de fases que pudieran mejorar la conductividad eléctrica de la red de percolación; además de encontrar la composición adecuada para cada fase composite la cual pudiera variar dependiendo de la fase activa semiconductor, además de una selección adecuada del contenedor para integrar todo el composite, y permitir que la pasta de carbono se vaya renovando mientras que presente una geometría adecuada para que llegue la irradiación.

Agradecimientos y financiamiento: SNPL agradece al SECIHTI la beca otorgada para estudios de posgrado. Los autores agradecen al Laboratorio de Microscopía Electrónica de la División de CBI de la UAM Azcapotzalco. Se agradece el apoyo financiero otorgado por la SIP-IPN mediante los Proyectos Multidisciplinarios y Transdisciplinarios de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico MULTI-2026-0022-M1 y MULTI-2026-0022-M3; así como el proyecto 2396 (módulos 20260206, 20260301 y 20260337). Los autores también agradecen el apoyo recibido a través del proyecto SECTEI/068/2025, “Evaluación del programa de cosecha de agua de lluvia en las escuelas públicas de la Ciudad de México: monitoreo de la calidad del agua y estrategias para fortalecer la apropiación de los SCALL desde las infancias”; y del programa Ejes Estratégicos de la SECIHTI, mediante el proyecto PEE-2025-G-69, “Determinación de las fuentes de descargas de aguas residuales en los ríos Tula, Lerma-Santiago y Atoyac: caracterización de contaminantes y evaluación del riesgo toxicológico”.

Bibliografía

- Acevedo-Pena, P., Vazquez-Arenas, J., Cabrera-Sierra, R., Lartundo-Rojas, L., & Gonzalez, I. (2013). Ti anodization in alkaline electrolyte: The relationship between transport of defects, film hydration and composition. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(6), C277. <https://doi.org/10.1149/2.063306jes>
- Bisquert, J. (2002). Theory of the impedance of electron diffusion and recombination in a thin layer. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(2), 325–333. <https://doi.org/10.1021/jp011941g>
- Carrera-Crespo, J., Fuentes-Camargo, I., Palma-Goyes, R., García-Pérez, U., Vazquez-Arenas, J., Chairez, I., & Poznyak, T. (2021). Unrevealing the effect of transparent fluorine-doped tin oxide (FTO) substrate and irradiance configuration to unmask the activity of FTO-BiVO₄ heterojunction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 128, 105717. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105717>
- Dong, Y., Su, Y., Hu, Y., Li, H., & Xie, W. (2020). Ag_2S -CdS p-n nanojunction-enhanced photocatalytic oxidation of alcohols to aldehydes. *Small*, 16(47), 2001529. <https://doi.org/10.1002/smll.202001529>
- Gerischer, H. (1990). The impact of semiconductors on the concepts of electrochemistry. *Electrochimica Acta*, 35(11–12), 1677–1699. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(90\)87067-C](https://doi.org/10.1016/0013-4686(90)87067-C)
- Guzmán, G., Vazquez-Arenas, J., Ramos-Sánchez, G., Bautista-Ramírez, M., & González, I. (2017). Improved performance of LiFePO_4 cathode for Li-ion batteries through percolation studies. *Electrochimica Acta*, 247, 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.06.172>
- Manzano-Zavala, M., Sosa-Rodríguez, F. S., Vazquez-Arenas, J., & Alvarez-Ramírez, J. (2024). Analysis of cooperative effects between activated carbons and acetylene black using electrochemical, rheological and textural characterizations to maximize supercapacitance. *Next Energy*, 2, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2023.100074>
- Palomares-Reyna, D., Gutiérrez-Lopez, A. N., Sosa-Rodríguez, F. S., & Vazquez-Arenas, J. (2023). Techniques to characterize the photoactivity of semiconductor materials defining performance in advanced oxidation processes and fuel generation. En *Trends and innovations in energetic sources, functional compounds and biotechnology: Science, sources, applications and experiments* (pp. 69–100). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46545-1_3

- Rajbhandari, A., Manandhar, K., & Pradhananga, R. J. (2011). Mott-Schottky analysis of laboratory prepared Ag₂S-AgI membrane electrode. *Journal of Nepal Chemical Society*, 28, 89–93. <https://doi.org/10.3126/jncs.v28i0.8113>
- Yadav, J., Raturi, P., Yadav, S., & Singh, J. (2021). Zig-zag Ag₂S nanostructures for superior optical absorption and photoelectrochemical water splitting performance. *Renewable Energy*, 179, 2256–2266. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.027>
- Yuan, L., Lu, S., Yang, F., Wang, Y., Jia, Y., Kadhim, M. S., & Zhao, Y. J. (2019). A facile room-temperature synthesis of three-dimensional coral-like Ag₂S nanostructure with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Materials Science*, 54, 3174–3186. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3051-4>