

Bioenergía Electroquímica: Placas que Utilizan Clorofila para la Generación de Energía Limpia

Yaretzi Guadalupe Suárez Ávila¹, Lea Marín Cruz¹

¹ Escuela Preparatoria de la Universidad La Salle, México. CDMX, México.

yaretzi.suarez@lasallistas.org.mx, lea.marin@lasallistas.org.mx

Resumen. La dependencia global de los combustibles fósiles representa la principal causa del cambio climático, siendo responsable del 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero. En respuesta a esta problemática, el presente proyecto busca desarrollar una fuente alternativa de energía limpia y sostenible mediante la construcción de un dispositivo formado a base de placas fotoelectroquímicas que incorporan pigmentos fotosintéticos extraídos de hojas de espinaca y óxido de zinc (ZnO). En esta estructura innovadora se logró observar el desarrollo de una diferencia de potencial eléctrico a partir de un proceso electroquímico, logrando el intercambio de electrones y iones para que se genere y consuma energía eléctrica. Los resultados mostraron que la placa no necesita una fuente de iluminación intensa, sino que la aprovecha para acelerar la reacción química de sus componentes. Se obtuvo una diferencia de potencial de 860 mV y 84.7 μ A por placa durante 5 horas, y se mantuvo constante hasta su disminución gradual por el desgaste del electrolito. Así mismo, se observó que el incremento de la temperatura y condiciones de luz muy intensas alteran negativamente el desempeño de la placa, esto las hace ideales para trabajar en condiciones de baja iluminación como el interior de una habitación.

Palabras Clave: Placa electroquímica, Pigmentos naturales, Energía limpia

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La energía es fundamental para la vida cotidiana en la actualidad, su consumo es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. Sin embargo, el suministro de energía mundial depende en gran medida de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural (1). De acuerdo con las Naciones Unidas (2020), el consumo de energía basado en estos combustibles es la principal causa del cambio climático, ya que al producir gases de efecto invernadero representan alrededor del 75% de las emisiones globales. Además, la dependencia de la industria energética en estos recursos no renovables provoca su explotación acelerada, agotando reservas que tardaron millones de años en formarse (3). A medida que se agotan las reservas, se vuelve cada vez más difícil y costoso extraerlos, lo que puede llevar a una crisis energética (3).

El consumo de energía *per cápita* es uno de los indicadores utilizados para determinar el desarrollo de un país, no obstante, es importante considerar la eficiencia energética y la sostenibilidad del sistema energético para garantizar un desarrollo económico sostenible (2-3). Desde múltiples perspectivas, como la crisis energética y la transición hacia energías renovables (2,5,7), han abordado la problemática energética. Estos enfoques hacen énfasis en la búsqueda de una mayor eficiencia energética en procesos de producción y consumo, así como en el impacto socioambiental, destacando la necesidad de un plan de acción y la implementación de proyectos (6).

Este proyecto contribuye directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En particular, se enfoca en el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), al investigar y desarrollar tecnologías innovadoras que aprovechan reacciones químicas de manera más eficiente para generar electricidad. El cumplimiento de la meta 7.b es muy relevante

para este proyecto, ya que esta busca ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para suministrar servicios de energía modernos y sostenibles para todos los países en desarrollo (2).

Además, este proyecto también integra al ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), ya que la generación de energía limpia y eficiente contribuye a la creación de ciudades más sostenibles y resilientes. Asimismo, se alinea con el ODS 13 (Acción por el clima), al promover la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la transición hacia una economía baja en carbono, lo que refiere a un sistema económico que busca reducir significativamente estas emisiones (2).

2 Objetivo

Desarrollar un modelo de placa electroquímica innovadora capaz de generar energía eléctrica, basada en reacciones de óxido-reducción con materiales que sean biodegradables, para contribuir a la producción de energía renovable y no contaminante.

3 Propuesta teórico-metodológica

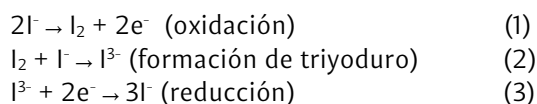
Parte del presente proyecto se centra en el estudio de la electroquímica, la cual es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía química y la energía eléctrica, a través de reacciones de óxido-reducción o redox que involucran la transferencia de electrones entre moléculas, y que ocurren en la interfase entre un conductor eléctrico (electrodo) y un conductor iónico (electrolito), pudiendo ser este último una disolución o un sólido para conducir iones y no electrones. (4)

Un proceso natural que comparte similitudes con la conversión de energía estudiada en electroquímica es la fotosíntesis, donde las plantas utilizan una red de pigmentos para capturar la energía lumínica y convertirla en energía química (8). Esto sucede en la membrana del tilacoide de un cloroplasto, donde los pigmentos fotosintéticos se organizan en complejos colectores de luz que capturan la energía lumínica y la dirigen hacia el centro de reacción, donde el par de moléculas de *clorofila a* colectoras de energía junto a proteínas asociadas transfieren electrones al sistema de transporte de electrones. Esto desencadena un flujo de electrones que impulsa la generación de energía química (8).

Para la elaboración de este proyecto, se seleccionó la espinaca debido a su alto contenido de *clorofila a* y *b* (14), los pigmentos fotosintéticos primarios responsables de su característico color verde oscuro. La concentración de clorofila puede variar de acuerdo con la especie y el tipo de hoja, pero se ha observado que las hojas con tonos verdes más intensos suelen tener niveles más altos de *clorofila b*, lo que la hace ideal para el desarrollo del diseño experimental, como se observa en la tabla 1, al igual que la clorofila actúa como centro redox principal: al ser excitada por la luz, puede oxidarse (donar electrones) o reducirse (aceptar electrones). Esta capacidad es fundamental en el fotosistema II (P680) para la oxidación del agua y en el fotosistema I (P700) para la reducción de la ferredoxina/NADP⁺. Por otro lado, la *clorofila b* funciona principalmente como pigmento accesorio que amplía la captación de luz y transfiere la energía a la *clorofila a*, sin participar directamente como centro redox. (11).

Es importante considerar que la extracción con metanol puede no ser selectiva y otros componentes del material vegetal, como carotenoides, flavonoides y otros pigmentos, pueden estar presentes en el extracto y tener un comportamiento redox. Por lo tanto, es posible que la actividad redox mediada no se deba exclusivamente a la *clorofila a* y *b*, sino que también pueda ser influenciada por la presencia de otros pigmentos con actividad redox en el extracto. A pesar de esta limitación, se considera que la *clorofila a* y *b* son los principales componentes responsables del comportamiento redox observado en el extracto (Figura 3). Sin embargo, se reconoce la importancia de realizar análisis adicionales para confirmar la pureza y la identidad de las *clorofilas a* y *b* en el extracto (15).

Asimismo, se utilizó el electrolito yoduro de potasio (KI) por su capacidad de participar en reacciones redox, donde el ion yoduro (I⁻) presente en el KI puede oxidarse a yodo molecular (I₂). El yoduro oxidado (I₂) reacciona con otro ion yoduro para formar triyoduro, que a su vez se reduce nuevamente a yoduro, completando el ciclo redox y permitiendo la generación continua de corriente eléctrica. (9, 13) La reacción se presenta de la siguiente manera:



La placa electroquímica se fabrica mediante la preparación de electrodos de vidrio conductor ITO (óxido de estaño e indio, por sus siglas en inglés), uno de los cuales se recubre con una delgada capa de óxido de zinc (ZnO). La capa de ZnO se prepara dispersando 3.3 g de ZnO y 20 mL de etanol al 96% y se deposita con ayuda de una pipeta beral posteriormente, esta capa se calienta a 50°C durante 20 minutos para asegurar su adherencia.

Posteriormente, se lleva a cabo la extracción del pigmento (basado principalmente en *clorofila a* y *b*) a partir de hojas de espinacas frescas, esto se logra al macerar 3.3 g sin nerviaciones en un crisol de porcelana, se añaden 0.5 g de CaCO₃, 40 mL de metanol (J.T. Baker, 99.8%) y 10 mL de agua destilada; posteriormente, el extracto obtenido se filtra por gravedad con papel filtro de poro grueso. El líquido recuperado adquiere una coloración de verde limón traslúcido, este color nos indicará que hay una mayor cantidad de *clorofila b*, la cual tiene la capacidad de transferir energía a la *clorofila a*. A continuación, se colocan 10 mL del extracto preparado de clorofila en una caja de Petri y se sumerge el vidrio con la capa de ZnO durante 55 minutos, permitiendo que el pigmento se adhiera al material semiconductor y actúe como fotosensibilizador.

El uso del ZnO como material semiconductor tipo N permite que los electrones generados por la absorción de luz solar por la clorofila se transfieran a la banda de conducción del ZnO. Estos electrones se mueven a través de la capa de ZnO y alcanzan el ánodo de la celda, generando electricidad en el circuito externo. (8, 9, 13)

El contraelectrodo se recubre con grafito de lápiz HB como medio conductor para facilitar la transferencia de electrones y completar el circuito eléctrico. Los electrodos se ensamblan enfrentados con una capa de una mezcla de 10 mL de gel comercial y 2.5 mL de yoduro de potasio (ver figura 1). Mientras la clorofila genera un flujo de electrones, en el contraelectrodo el triyoduro recibe electrones y se vuelve yoduro, el yoduro se oxida a iones triyoduro al donarle electrones a la clorofila. Esto completa el ciclo redox y permite generar electricidad de manera eficiente. (10, 12) Ver figura 1.

4 Discusión de resultados

Para desarrollar la placa electroquímica, se llevaron a cabo diversas pruebas utilizando extractos de menta, hierbabuena, clorofila comercial y espinaca. La espinaca resultó ser la opción más efectiva debido a su alta concentración de clorofila (14), lo que se reflejó en los resultados obtenidos. En la tabla 1 se presentan las variables que se evaluaron durante el proceso de desarrollo de la placa final, así como en la figura 3 se muestran las cromatografías realizadas de cada extracto.

En el caso de la extracción del pigmento, se encontró que, al utilizar metanol en la extracción de clorofila de las hojas de espinaca, el color verde limón observado puede relacionarse con un alto contenido de *clorofila b*, en comparación con el tono verde oscuro que se obtiene en el extracto realizado con el etanol, lo cual puede relacionarse con la presencia de clorofila *a* y *clorofila b* al utilizar este disolvente.

Cabe mencionar que, con fines comparativos se realizó un ensayo utilizando como pigmento una clorofila concentrada comercial, no obstante, el mejor desempeño se obtuvo con el pigmento extraído de las hojas de espinaca (tabla 1).

Por otra parte, se observó que, en condiciones de alta temperatura y luz intensa, la diferencia de potencial disminuye rápidamente, por lo sugiere que la placa es más adecuada para entornos con iluminación limitada. Estos hallazgos demuestran que la estructura desarrollada es capaz de generar electricidad a través de una reacción química acelerada por la luz, pero no depende directamente de la luz para funcionar. Esto hace a la placa una opción viable para aplicaciones nocturnas y en entornos nublados. Se registró una disminución gradual de la corriente eléctrica después de 5 horas, esto podría indicar que el electrolito comenzó a evaporarse, lo que sugiere la necesidad de mejorar la durabilidad y estabilidad a largo plazo de la estructura para mantener su rendimiento óptimo.

Una placa de 25 cm² demostró una notable estabilidad y eficiencia al generar 860 mV y 84.7 µA durante 5 horas de manera constante en condiciones de iluminación reducida (ver figura 2). La conexión en serie de dos placas permitió duplicar la generación de energía, alcanzando 1700 mV. Estos datos sugieren que la implementación de placas electroquímicas en serie configuradas de manera similar a las celdas solares de un panel solar, podría ser una estrategia efectiva para aumentar la corriente y generar una mayor cantidad de energía de manera escalable.

Los resultados obtenidos son significativos para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y contribuyen a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, específicamente al ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y ODS 13 (Acción por el Clima) al apoyar en el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

En este proyecto se ha desarrollado una estructura química innovadora de placas electroquímicas que aprovecha la reacción de sus componentes para generar electricidad. Los resultados demuestran que esta estructura puede usarse como fuente de energía sostenible y limpia con materiales biodegradables. Al conectar dos placas en serie, se logró obtener una mayor diferencia de potencial, lo que sugiere que esta tecnología podría ser escalable y adaptable en varias aplicaciones. Las placas podrían ser organizadas de manera similar a las celdas solares en un panel solar, lo que permitiría aprovechar al máximo su potencial. La independencia de la luz directa para generar electricidad y la utilización de materiales biodegradables y accesibles son aspectos destacados de esta investigación que podrían tener un impacto positivo en el medio ambiente.

A largo plazo, se espera que estas placas electroquímicas se conviertan en una alternativa viable a las fuentes de energía tradicionales para comunidades remotas y aisladas que impulsen la transición hacia un futuro energético más limpio, renovable y sostenible.

6 Agradecimientos

Agradecemos a nuestros asesores, la Mtra. Susana Ulloa Arellano, el Dr. Víctor Fabián Ruíz Ruíz, así como también a la Mtra. Nelly del Carmen Flores Sánchez, por su guía y orientación experta a lo largo de este proyecto, al personal del laboratorio de química de la Universidad La Salle Condesa por su asistencia y apoyo técnico, así como a nuestra familia por el apoyo que nos brindaron durante este proyecto, no habría sido posible sin la contribución de todas estas personas.

7 Referencias

1. Nations, U. (2020). *Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas*. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
2. Gamez, M. J. (2022, May 24). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
3. *¿Qué es la transición hacia una energía sostenible y por qué es clave para combatir el cambio climático? | UNDP Climate Promise*. (2024, March 12). UNDP Climate Promise. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-es-la-transicion-hacia-una-energia-sostenible-y-por-que-es-clave-para-combatir>
4. *Electroquímica*. (2025). Quimica.es. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Electroqu%C3%ADmica.html>
5. *National Geographic*. 2626620. (2022). Nationalgeographicla.com. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>
6. Rivas, R., Mirelle, T., Mera, S., & Santos Cruz, J. (n.d.). *Cronología y Revisión de Tecnologías Fotovoltaicas*. https://www.revistaelectronica-ipn.org/ResourcesFiles/Contenido/25/TECNOLOGIA_25_000979.pdf
7. Lima, T., Eugenia, & Valdiviezo, C. (2025). *Diseño ambiental y producción de conocimiento interdisciplinario. Argumentos* (México, D.F.), 24(67), 159-183. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952011000300008
8. Manuel, J., Jesús, S.-D., Azucena, B., Carlos, J., Núñez-Ayala, F., & Libertad. (2019). *Generación Eléctrica a Partir de la Fotosíntesis Natural; ¿Una Realidad Escalable?* Electricity Generation from Natural

- Photosynthesis; A Scalable Reality? *Artículo Revista de Energías Renovables Septiembre, 3(1)*, 1–6. <https://doi.org/10.35429/JRE.2019.10.3.1.6>
9. Rosario, M., Benavides, A. U., Cabrera, E. P., & Vázquez, M. A. (2025). Celdas Solares. Colorantes mimetizadores de la fotosíntesis empleados en la generación de electricidad. *Naturaleza Y Tecnología, 1(4)*. <http://naturalezaytecnologia.ugto.mx/index.php/nyt/article/view/246/128>
 10. Hendrickson, T. P., et al. (2020). Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Industrial Ecology, 24(3)*, 531–542. doi: 10.1111/jiec.12953
 11. *Lámparas LED y UV para cultivos | Como el Color de la Luz Afecta a la Fotosíntesis.* (2021). Buresinnova.com. <https://www.buresinnova.com/blog/como-el-color-de-la-luz-afecta-la-fotosintesis>
 12. Smith, Y. R., Crone, E., & Subramanian, V. R. (2013). A Simple Photocell To Demonstrate Solar Energy Using Benign Household Ingredients. *Journal of Chemical Education, 90(10)*, 1358–1361. <https://doi.org/10.1021/ed3001232>
 13. Alejandro, C. (2017). *Fabricación de Electrodo Nanoestructurado de ZnO Para Aplicaciones Fotovoltaicas.* Revista Científica TECNIA. https://www.academia.edu/100587667/FABRICACION_DE_ELECTRODOS_NANOESTRUCTURADOS_DE_ZnO_PARA_APLICACIONES_FOTOVOLTAICAS
 14. Santiago, R., Velázquez, R., Becerra, H., Jiménez, G., Villarreal, V., & Clorofila, L. (2019). *Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco resumen.* 4. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/126.pdf>
 15. Conde, A. (2025). *expo tecnicas.* Scribd. <https://es.scribd.com/presentation/538016479/expo-tecnicas>

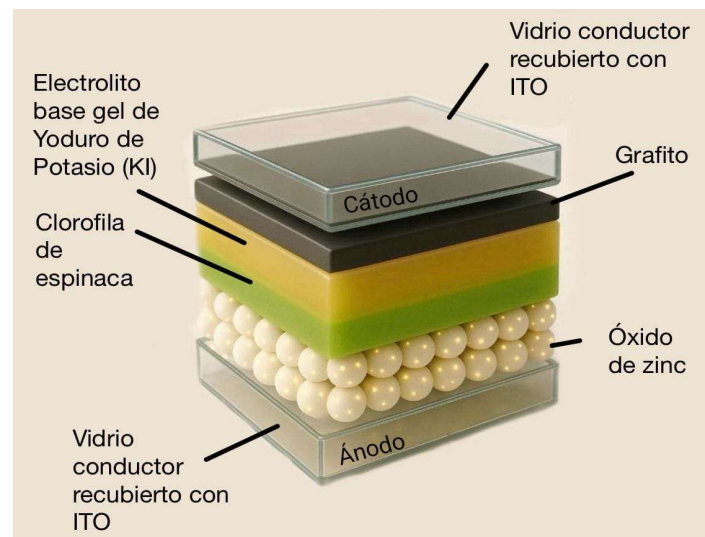


Figura 1. Estructura de la placa electroquímica. OpenAI. (2025). ChatGPT. <https://chatopenai.com/chat>

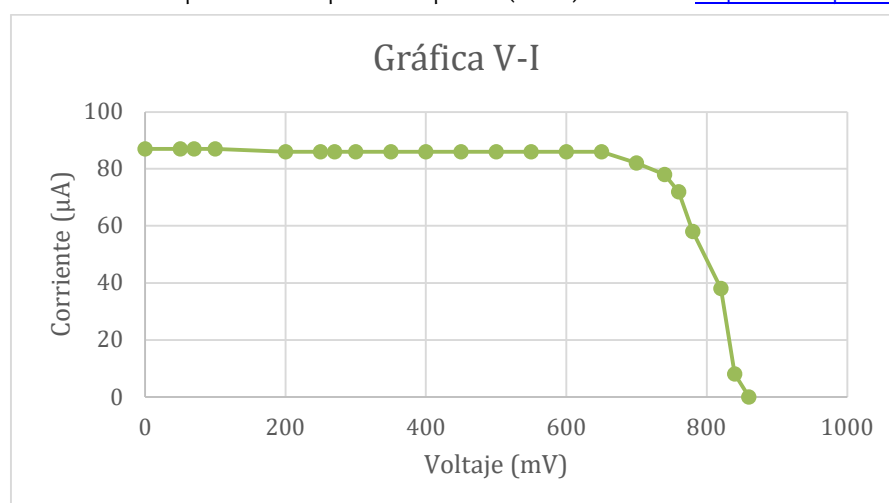


Figura 2. Curva de Voltaje-Corriente en placa electroquímica de espinaca extraída con metanol utilizando vidrio ITO. Elaboración propia.

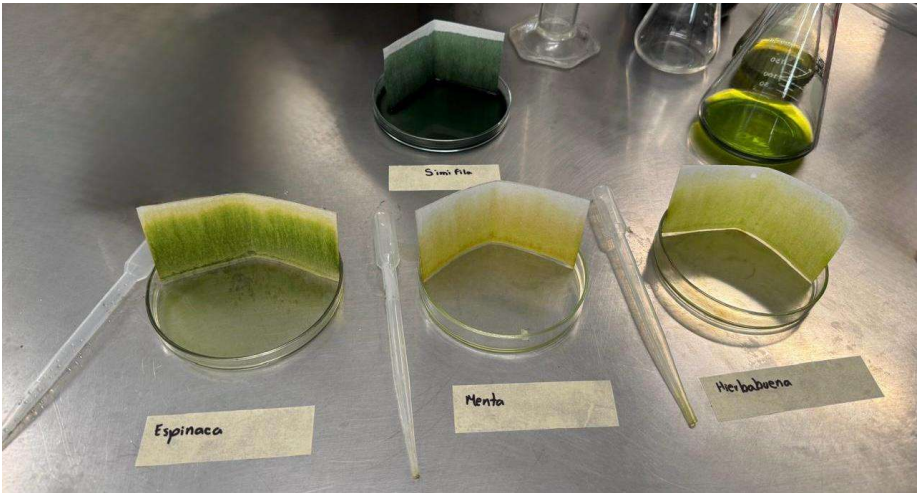


Figura 3. Cromatografías de espinaca, menta, hierbabuena y clorofila comercial. Elaboración propia.

Pruebas de Bioplaca Electroquímica

Vidrio ITO+Clorofila+Grafito	ΔV (mínimo - máximo)
HIERBABUENA + KI (BASE GEL)	1mV – 122mV
MENTA+ KI (BASE GEL)	6mV – 22mV
CLOROFILA COMERCIAL + KI (BASE GEL)	0mV – 9mV
1 CAPA DE CLOROFILA (ESPINACA CON ETANOL) + KI (BASE GEL)	29.2mV – 40.2mV
1 CAPA DE CLOROFILA (ESPINACA CON METANOL) + KI (BASE GEL)	270mV – 860mV
2 CAPAS DE CLOROFILA (ESPINACA CON METANOL) + KI (BASE GEL)	1.6mV – 6.0mV
1 CAPA DE CLOROFILA (ESPINACA CON METANOL) + SOLUCIÓN SALINA (BASE GEL)	0.0mV – 14.3mV
1 CAPA DE CLOROFILA (ESPINACA CON METANOL) + KI (BASE GEL) + VIDRIO CONDUCTOR DEL CELULAR (RECICLADO) (CONECTADO EN SERIE)	1126mV – 1131mV
1 CAPA DE CLOROFILA (ESPINACA CON METANOL) + KI (BASE GEL) + VIDRIO ITO (CONECTADO EN SERIE)	1650mV – 1700mV

Tabla 1. Comparación de la diferencia de potencial en milivoltios de las diversas pruebas que se realizaron para determinar los mejores materiales en la elaboración de la placa final. Elaboración propia.