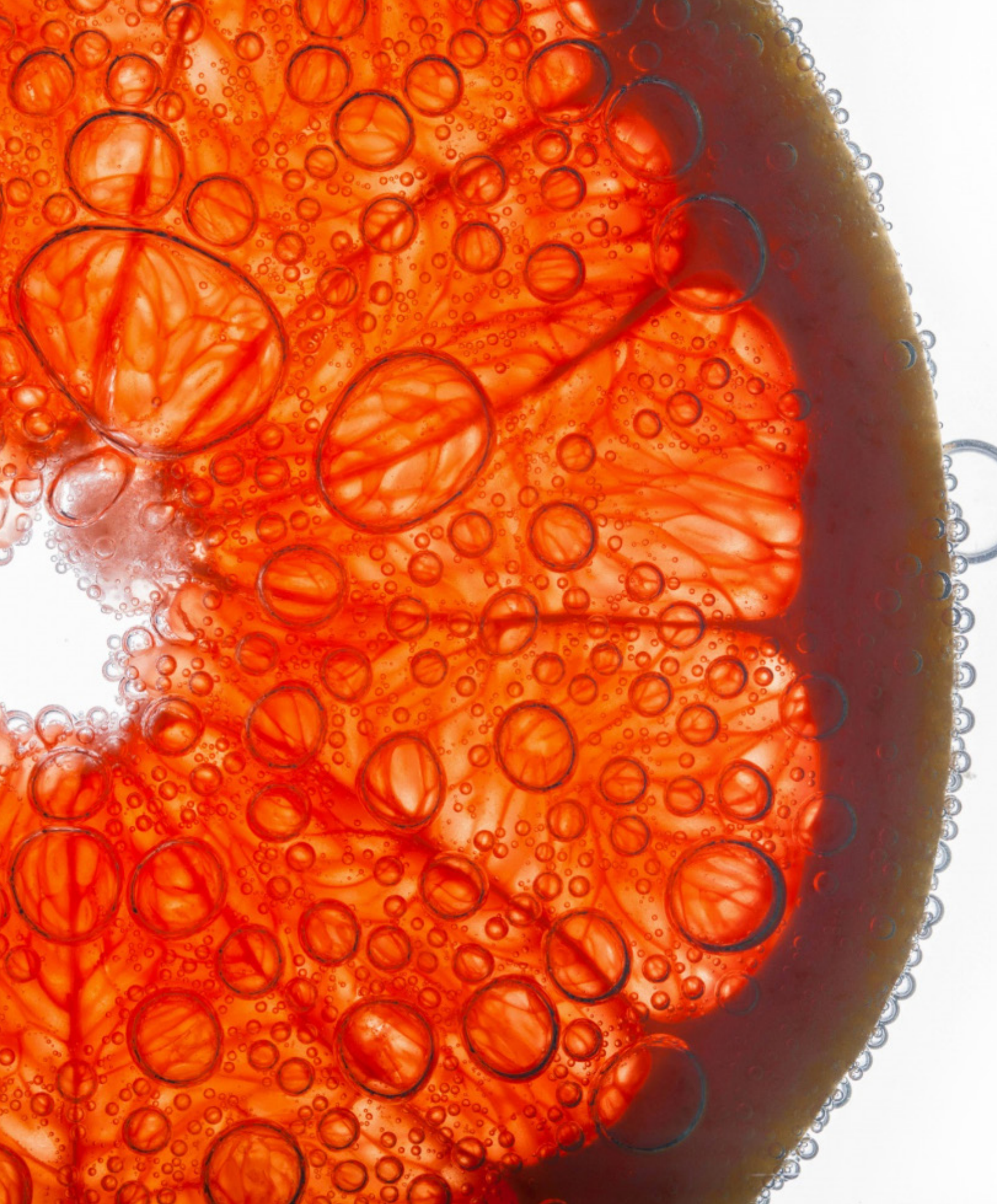




Nanosensores electroquímicos. Una alternativa para la detección de antioxidantes en alimentos

Zaira Mora Mora^{1*}, Ma. Guadalupe Garnica Romo²

¹Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas, Facultad de Químico Farmacobiología;

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

*Correo: 2026096g@umich.mx

Resumen

Hablar de antioxidantes ha dejado de ser exclusivo del ámbito científico para convertirse en parte del lenguaje cotidiano asociado a la alimentación saludable. Elegimos ciertas frutas, verduras y productos “funcionales” con la idea de que tienen estos compuestos que aportan beneficios a la salud, más allá de la nutrición básica. Pero ¿cómo saber que realmente están ahí? Esto solo puede resolverse midiendo.

Medir antioxidantes no es sencillo. No se pueden ver a simple vista ni identificar por sabor o apariencia. Para detectarlos, son necesarias herramientas científicas capaces de interpretar lo que ocurre a nivel molecular.

Este artículo revisa, desde una perspectiva accesible, cómo se determinan estos compuestos y por qué no siempre es sencillo hacerlo fuera de entornos especializados. Se introduce el uso de nanosensores electroquímicos como una alternativa emergente para la detección de estos compuestos de forma práctica. Más allá de describir una tecnología, se propone una forma distinta de entender el análisis de alimentos, donde conceptos como superficie, nanomaterial y transferencia de electrones permiten traducir lo que ocurre a escala molecular en información comprensible. De esta manera, se busca acercar al lector a una línea de investigación actual, destacando sus retos y su potencial, en la vida cotidiana.

Palabras clave: Electroanálisis de alimentos, antioxidantes, electroquímica analítica, nanosensores, ingeniería de materiales



Abstract

S In recent years, antioxidants have moved beyond the scientific domain and become part of everyday language associated with healthy eating. Fruits, vegetables, and “functional” products are often chosen under the assumption that they contain compounds capable of providing health benefits beyond basic nutrition. But how can we know if these compounds are present? This can only be answered through measurement.

However, measuring antioxidants is not straightforward. They cannot be seen with the naked eye nor identified by taste or appearance. Their detection requires scientific tools capable of interpreting processes occurring at the molecular level.

This article reviews, from an accessible perspective, how these compounds are determined and why their analysis is not always feasible outside specialized environments. It introduces electrochemical nanosensors as an emerging alternative for their detection in a more practical manner. Beyond describing a technology, the work proposes a different way of understanding food analysis, where concepts such as surface, nanomaterial, and electron transfer allow molecular-scale processes to be translated into meaningful information. In this way, the article aims to bring readers closer to a current research field, highlighting both its challenges and its potential in everyday contexts.

Keywords: Food Electroanalysis, antioxidants, analytical electrochemistry, nanosensors, materials engineering



Introducción

Llevar una alimentación saludable ya no es solo cuestión de hábitos, sino también de información. Comprender lo que los alimentos pueden aportarnos implica tomar decisiones conscientes: elegir aquellos que no solo nos nutren y proporcionan energía, sino también aquellos que contribuyen al mantenimiento de la salud.

Promover una alimentación saludable no es una tendencia reciente. Desde hace años, se impulsan estrategias para fomentar una dieta equilibrada, entre ellas herramientas gráficas como el “Plato del Bien Comer”, así como constantes campañas del sector salud que fomentan el consumo de alimentos naturales, especialmente frutas y verduras frescas. Sin embargo, hoy sabemos que los alimentos no solo aportan nutrientes básicos (como carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales), sino que también contienen compuestos llamados “bioactivos” capaces de ejercer efectos benéficos adicionales en el organismo.

Entre los compuestos bioactivos, los antioxidantes han adquirido especial relevancia. Su capacidad para neutralizar radicales libres (moléculas reactivas que pueden causar daño celular) no solo es aprovechada para preservar los alimentos, sino que también se ha relacionado con beneficios a la salud, incluyendo la prevención del envejecimiento prematuro. Además, su asocia-

ción científica con la prevención de enfermedades crónico-degenerativas ha impulsado su presencia en el discurso cotidiano, donde términos como “alimentos antioxidantes” combinan ciencia, salud y tendencias (Brunetti 2024).

No obstante, toda tendencia saludable requiere evidencia, por lo que surge una pregunta fundamental: ¿cómo sabemos que esos compuestos realmente están presentes en los alimentos?

La respuesta implica medir: no solo detectar, sino también cuantificar. Saber que un alimento contiene antioxidantes no es suficiente; también es necesario saber en qué cantidad. Esto es importante para valorar su contribución dentro de una dieta equilibrada e influir en la manera en que elegimos y combinamos los alimentos.

Es aquí donde la ciencia, a través del análisis de alimentos tanto naturales como procesados, nos permite tomar decisiones más conscientes e informadas sobre nuestra alimentación, representando un punto de intersección entre salud, industria y calidad de vida.

Considerando lo anterior, este texto revisa los métodos tradicionales utilizados para el estudio de antioxidantes, así como el papel emergente de los nanosensores electroquímicos como una alternativa tecnológica para su análisis.

¿Cómo se miden los antioxidantes?

Antes de abordar cómo se miden, es importante retomar qué son los antioxidantes, ya que, como se mencionó anteriormente, no es posible detectarlos de forma directa. Su medición debe realizarse de manera indirecta, aprovechando su naturaleza química y su estructura molecular.

Algunos antioxidantes nos resultaran muy familiares en la vida cotidiana, como la vitamina C o el ácido cítrico; sin embargo, existen muchos más con estructuras y comportamientos diversos. Lo que todos comparten es su capacidad de participar en reacciones de óxido-reducción (redox), es decir, procesos donde ocurre transferencia de electrones.

En términos simples, los antioxidantes pueden donar electrones, mientras que los radicales libres (moléculas oxidantes altamente reactivas que pueden causar daño celular) tienden a aceptarlos. Esta interacción no solo explica su función biológica "antioxidante", sino que también constituye la base de diversos métodos empleados para su análisis.

Por ello, los métodos analíticos no detectan "antioxidantes" como tal, sino las señales generadas por las reacciones en las que participan. En otras palabras, medir antioxidantes implica diseñar estrategias capaces de interpretar lo invisible a partir de sus efectos.

Ahora sí, respondiendo la pregunta de esta sección: para el análisis de estos compuestos, se han desarrollado distintos métodos analíticos. Sin embargo, es importante resaltar que no todos miden lo mismo ni proporcionan la misma información. Mientras algunos permiten identificar o cuantificar compuestos específicos, otros estiman grupos de sustancias o propiedades químicas asociadas con ellos. Además, su aplicabilidad puede variar según el tipo de muestra, el objetivo y las condiciones del análisis.



Estos métodos pueden agruparse en dos enfoques: aquellos basados en química clásica, más accesibles, pero de sensibilidad limitada, y aquellos instrumentales, que ofrecen mayor detalle analítico, aunque con mayor complejidad (Brunetti 2024).

Dentro del primer grupo se encuentran los métodos químicos, basados en reacciones óxido-reductoras (redox), como las titulaciones. En estos casos, la cuantificación se realiza a partir del volumen de reactivo necesario para completar una reacción, generalmente evidenciada por un cambio de color, como ocurre en la determinación de vitamina C por métodos como la titulación con 2,6-diclorofenolindofenol (DCPIP) o la titulación yodométrica. Son directos, económicos y relativamente fáciles de implementar; sin embargo, su aplicación suele limitarse a compuestos específicos y no son adecuados para sistemas complejos donde coexisten múltiples antioxidantes. Por otro lado, los ensayos químicos con detección espectrofotométrica, como DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) y Folin-Ciocalteu, representan un punto intermedio. Ambos se basan en reacciones químicas que generan cambios de color, los cuales se cuantifican mediante la medición de la absorción de luz usando técnicas espectrométricas.

El ensayo DPPH evalúa la capacidad de una muestra para neutralizar radicales libres, uno de los mecanismos mediante los cuales los antioxidantes ejercen su función. Sin embargo, proporciona una respuesta global de la muestra, por lo que no identifica ni cuantifica compuestos específicos, ni permite por sí solo inferir sus posibles efectos funcionales en el organismo. El método de Folin-Ciocalteu, por su parte, se utiliza para estimar el contenido

de compuestos fenólicos, un grupo importante de antioxidantes presentes principalmente en plantas. Sus resultados suelen expresarse como equivalentes de ácido gálico (utilizado como estándar analítico). Sin embargo, dependiendo del tipo de muestra analizada, otras sustancias con capacidad reductora también pueden contribuir a la señal medida.

En el otro extremo se encuentra el uso de técnicas cromatográficas, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), la cual permite separar los componentes de una muestra compleja para que lleguen individualmente a un detector. Con ayuda de una metodología adecuada y la comparación con estándares de referencia, es posible identificar y cuantificar compuestos específicos, entre ellos diversos antioxidantes.

Este contraste muestra que estos métodos son complementarios. Cada uno responde a una pregunta distinta y presenta ventajas y limitaciones propias; por ello, su elección depende de la información que se desea obtener, así como del nivel de detalle y los recursos disponibles.



Limitaciones de los métodos actuales

Aunque estas técnicas han sido fundamentales para el estudio de antioxidantes en alimentos, presentan limitaciones importantes.

Los ensayos químicos y espectrofotométricos, aunque rápidos y accesibles, pueden verse afectados por interferencias, lo que reduce su selectividad y precisión en sistemas complejos.

Por otro lado, las técnicas cromatográficas, si bien son altamente precisas, requieren equipos costosos, personal especializado y tiempos de análisis prolongados. Además, su uso puede resultar poco práctico en aplicaciones que demandan respuestas rápidas, monitoreo continuo o análisis en el sitio de interés.

En la práctica, este tipo de infraestructura no siempre está disponible o resulta poco accesible directamente en el lugar donde se requiere el análisis, como una línea de producción continua, un campo agrícola o un entorno

educativo. Esto puede dificultar la obtención de resultados rápidos y la toma oportuna de decisiones. Lo anterior genera una brecha importante: sabemos mucho sobre los antioxidantes en condiciones controladas, pero no siempre podemos evaluarlos de forma oportuna en situaciones prácticas.

Esta limitación no es menor; restringe la aplicación del conocimiento científico y dificulta su aprovechamiento. Así surge una necesidad clara: contar con herramientas que permitan medir de manera más directa, rápida y accesible, sin comprometer la confiabilidad de los resultados.

Esto conduce a una pregunta clave: ¿es posible medir con suficiente precisión sin depender exclusivamente de infraestructura compleja?

La respuesta se encuentra en la convergencia entre la electroquímica y la nanotecnología, que han dado lugar a una prometedora alternativa, el desarrollo de nanosensores electroquímicos.

Nanosensores electroquímicos: principio y funcionamiento

Ya mencionamos una propiedad clave de los antioxidantes: **pueden donar electrones**.

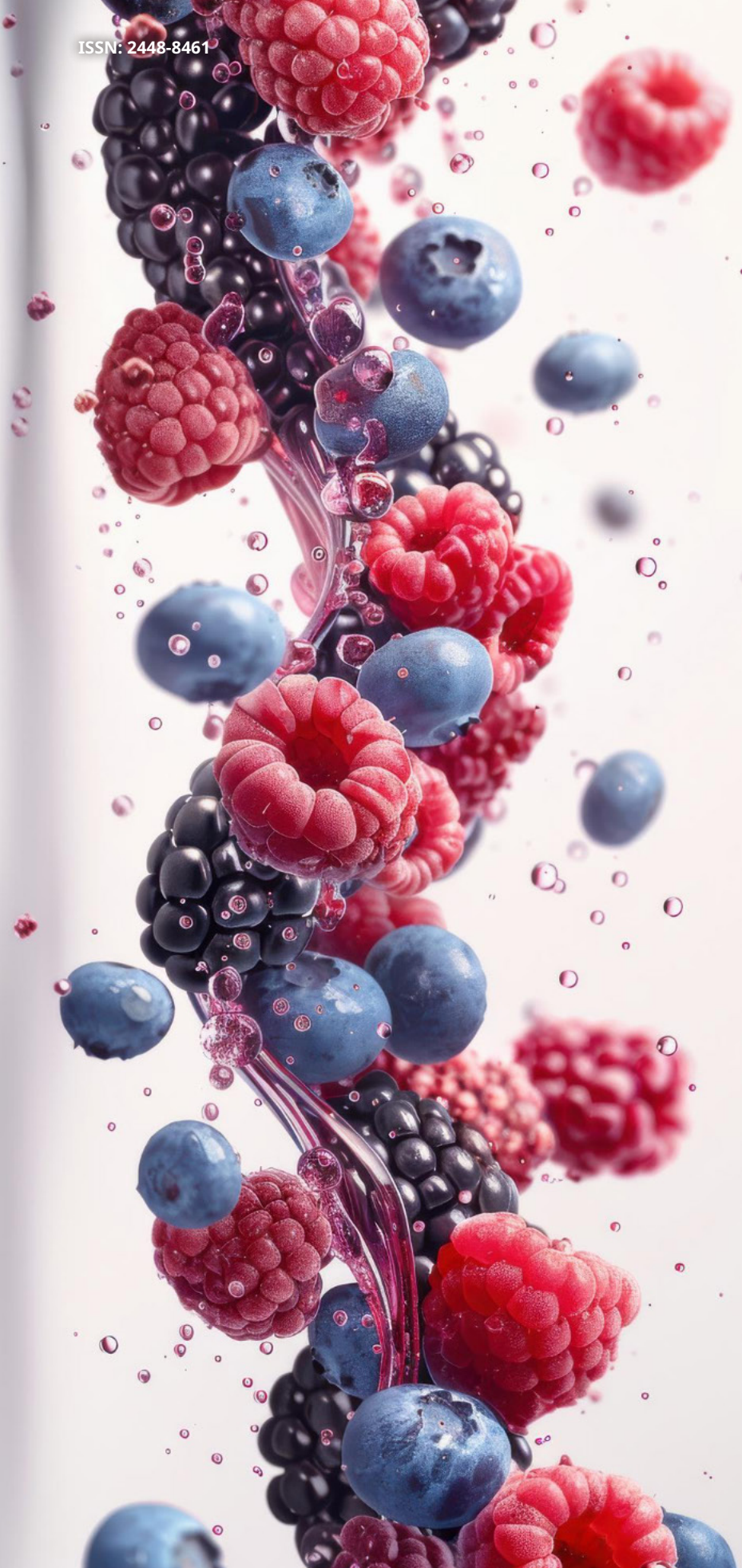
Por lo tanto, si nos enfocamos en observar cómo interactúan sus moléculas con un material conductor, podría surgir un nuevo principio de detección: el principio electroquímico.

Cuando esta interacción ocurre en la superficie de un electrodo conductor (sensor), bajo un campo eléctrico controlado o inducido mediante técnicas electroquímicas como la voltametría, se produce una transferencia de electrones entre la superficie y el antioxidante. Esta corriente o flujo de electrones, aunque no es perceptible para nosotros, genera una señal eléctrica cuya magnitud puede medirse y, mediante una calibración adecuada y el uso de patrones de referencia, relacionarse con la concentración del antioxidante bajo análisis.



En términos simples, una mayor concentración de antioxidante genera una mayor señal eléctrica. Este comportamiento puede describirse mediante relaciones electroquímicas como la ecuación de Randles-Sevcik, que vincula la corriente generada con la concentración del analito en sistemas controlados por difusión, es decir, donde la señal depende de qué tan rápido llegan las moléculas de antioxidante a interactuar con el electrodo.

Así, una reacción química se transforma en una señal eléctrica cuantificable, siendo este el fundamento de detección de los nanosensores electroquímicos. A diferencia de los métodos tradicionales, este enfoque permite una detección rápida, directa y con potencial de miniaturización.



El papel de la nanotecnología en la detección

Ahora abordemos la importancia del prefijo “nano”. El verdadero potencial del enfoque electroquímico se alcanza cuando se combina con la nanotecnología.

Esto se debe a que un mismo material puede comportarse de manera distinta al pasar de la escala macroscópica (visible para nosotros) a la escala nanométrica (millonésimas de milímetro). A estas nuevas y diminutas dimensiones, surgen propiedades que no se observan en el material a mayor escala, como cambios en su reactividad, conductividad, resistencia o interacción con otras moléculas (Curulli 2020). Esta capacidad de modificar el comportamiento de los materiales a partir de su tamaño es una de las bases de la nanotecnología y explica su papel en la actual revolución tecnológica.

Los materiales nanoestructurados, como las nanopartículas, nanohilos, nanotubos, nanoalambres, nanocubos, entre otras morfologías, ofrecen una mayor área de superficie por lo que son más activos en comparación con materiales convencionales. Esto implica un mayor número de sitios disponibles para la interacción con las moléculas, lo que se traduce en señales más intensas y sensibles.

Sin embargo, el efecto de la nanoestructura no se limita al aumento del área superficial. A esta escala, el tamaño y la forma de las estructuras juegan un papel fundamental. Estas características determinan cómo las moléculas se aproximan, interactúan y transfieren electrones en la superficie.

No es lo mismo una superficie plana que una porosa, o formada por nanotubos de mayor longitud ordenados o desordenados: la geometría define la forma en que ocurre la interacción. En

sistemas nanoestructurados, pequeñas variaciones en dimensiones, orientación o distribución pueden modificar significativamente la respuesta electroquímica. Otra ventaja es la posibilidad de diseñar materiales híbridos, combinando distintos componentes para aprovechar la sinergia entre sus propiedades y optimizar la detección.

Por ejemplo, en el desarrollo de nanosensores electroquímicos basados en óxido de titanio (TiO_2), es posible incorporar átomos o nanopartículas de metales de transición como plata, níquel, hierro u oro en un proceso llamado dopaje. Esta combinación permite conservar la estabilidad química y estructural del TiO_2 , mientras que los metales pueden mejorar la conductividad eléctrica y favorecer la transferencia de electrones (Garnica-Romo *et al.* 2024).

Desde una perspectiva experimental, el desarrollo de nanosensores electroquímicos no consiste únicamente en seleccionar un material, sino realizar un correcto diseño de ingeniería. Para esto debemos comprender

cómo su estructura, tamaño, forma y composición determinarían la respuesta de detección. Ya que estos factores influirían directamente en aspectos clave como la sensibilidad, la reproducibilidad y la estabilidad del sistema.

Por ello, el reto no es únicamente detectar antioxidantes, es hacerlo de manera confiable, selectiva y consistente en condiciones reales.

En conjunto, la nanotecnología no solo mejora el desempeño de los sensores electroquímicos, sino que redefine la forma en que se diseñan y se entienden estos sistemas, consolidándolos como una plataforma con alto potencial en el análisis de compuestos bioactivos.

De la investigación al dispositivo portátil

Uno de los aspectos más prometedores de los nanosensores electroquímicos es su potencial para evolucionar desde sistemas de laboratorio hacia dispositivos portátiles. La idea es que, en el futuro, sea posible realizar mediciones tiempo real con herramientas compactas, similares a otros dispositivos de uso cotidiano, como el glucómetro, utilizado para detectar azúcar en sangre mediante el principio electroquímico. Este paso no es inmediato ni sencillo. Implica traducir un sistema complejo en una tecnología accesible, sin perder precisión.

La integración de sensores, electrónica y procesamiento de señal en dispositivos portátiles permitiría realizar análisis en tiempo real y en distintos contextos.



Aplicaciones y alcances

Los nanosensores electroquímicos tienen el potencial de aplicarse en diversos contextos: en la industria alimentaria para la verificación de contenido de compuestos antioxidantes, ya sea en campo para una evaluación rápida de productos frescos, en el hogar para interpretación del valor funcional de los alimentos o en entornos de la educación y emprendimiento como herramientas didácticas y desarrollo tecnológico.

Esta versatilidad los posiciona como una tecnología con impacto potencial en múltiples sectores. No es solo tecnología, es cambio de paradigma y análisis fuera del laboratorio. No se trata de reemplazar métodos, si no ampliar las posibilidades.



Figura 1. Nanosensores electroquímicos como alternativa para la detección de antioxidantes. Imagen generada con ChatGPT (OpenIA).

Retos y perspectivas

A pesar de su potencial, es importante mantener una perspectiva crítica, estos sistemas aún enfrentan desafíos importantes, como la estabilidad a largo plazo, la reproducibilidad y la selectividad en matrices complejas. Además, es necesario avanzar en la estandarización y validación de estos métodos para su aceptación generalizada.

Por ello, los nanosensores electroquímicos deben entenderse como una tecnología en desarrollo, con un alto potencial, pero aún en proceso de consolidación.

Para seguir reflexionando, nos queda el cuestionamiento ¿Será la Inteligencia Artificial la pieza faltante para el total desarrollo conceptual, tecnológico y biotecnológico de los nanosensores?

Retos y perspectivas

Entender lo que comemos no solo depende de elegir bien, sino también de contar con herramientas que nos permitan interpretar esa información.

Los nanosensores electroquímicos proponen una forma distinta de hacerlo: traduciendo interacciones invisibles en señales medibles, y acercando el análisis químico a contextos más cotidianos. Más que reemplazar a los métodos tradicionales, estos sistemas buscan complementarlos, ofreciendo alternativas más accesibles y versátiles para la detección de antioxidantes.

En ese sentido, no solo representan un avance tecnológico, sino también un cambio en la manera en que la ciencia puede integrarse en la vida diaria. Su valor no radica únicamente en la medición de antioxidantes, sino en la capacidad de transformar datos en conocimiento útil que permita tomar decisiones más informadas sobre los alimentos que consumimos.

Agradecimientos

La presentación de este trabajo refleja el desarrollo académico alcanzado durante la formación doctoral en el área de Biotecnología Alimentaria y ha sido posible gracias al respaldo y guía de los académicos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, así como al financiamiento otorgado por SECIHTI.

Nanosensores electroquímicos. Una alternativa para la detección de antioxidantes en alimentos

Referencias

Brunetti B (2024) Electrochemical Sensors and Biosensors for the Determination of Food Nutritional and Bioactive Compounds: Recent Advances, *Sensors* 24: 6588. <https://doi.org/10.3390/s24206588>

Curulli A (2020) Nanomaterials in Electrochemical Sensing Area: Applications and Challenges in Food Analysis. *Molecules*, 25: 5759, <https://doi.org/10.3390/molecules25235759>

Garnica-Romo M G, Mora-Mora Z, Alvarado-Gil, J J, Martínez-Flores H E (2024) Electrochemical nanosensor based on Ag-doped TiO₂ nanotubes for detecting ascorbic acid. *International Journal of Electrochemical Science* 19: 100481. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100481>

