

BIOSENSORES: EN BUSCA DE MICROORGANISMOS Y CONTAMINANTES EN VEGETALES

BIOSENSORS: IN SEARCH OF PLANT MICROORGANISMS AND CONTAMINANTS

Vianey Antonio Domínguez^{1*}
Melissa Prieto Barrera¹

¹Facultad de Ciencias Biológicas. Licenciatura en Biotecnología.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Blvd. Valsequillo y
Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, Col. Jardines de San Manuel
C. P. 72570 Puebla, Pue. México.

vianey.antoniod@alumno.buap.mx, melissa.prieto@alumno.buap.mx

Abstract

The detection of contaminants and pathogen microorganisms have been one of the main objectives in the environmental and agriculture sector due to the losses in crop production, although they are not emerging problems, its age has led the scientific community to the search for new identification strategies finding itself with biotechnology in the development of biological-based technologies that allow the detection of contaminants and pathogens present in plants in a fast and reliable way. The biosensors have allowed us to establish a bridge between the natural and the technological world with the purpose of generating alternatives to this and other problems such as clinical diagnostics, drug discovery, food quality control and environmental monitoring. The variety in biological elements offers, according to its properties, selective information of the component to analyze. Inside the agricultural sector the most used are the antibodies, aptamers or nucleic acids-based for the detection of pathogens like bacteria, fungi and viruses; and the enzymatic ones for plant contaminants. Due to the sensitivity that they present is for what they also require certain conditions to be able to perform a correct operation which also makes it into a limitation for environments that are in constant change. In this context, a review is made about the different advantages and disadvantages of the types of biosensors and their applications in the detection of the components of agricultural interest, as well as an example of the new advances developed for this sector.

Keywords: biosensor, detection, plant contaminants, biomonitoring, pathogen microorganisms

Resumen

La detección de contaminantes y microorganismos dañinos para las plantas ha sido uno de los principales objetivos del sector ambiental y agrícola debido a las pérdidas en la producción de cultivos si bien no se trata de problemáticas emergentes, su antigüedad ha llevado a la comunidad científica en búsqueda de nuevas estrategias de identificación, encontrándose con la biotecnología en el desarrollo de tecnologías con bases biológicas que permitan detectar los contaminantes y patógenos presentes en las plantas de una manera rápida y confiable. Los biosensores han permitido establecer un puente entre el mundo natural y el tecnológico con el propósito de generar alternativas para esta y otras problemáticas; pudiendo ser diagnósticos clínicos, hallazgo de fármacos, control de calidad alimentaria y monitoreo ambiental. Su variedad de elementos de origen biológico ofrece de acuerdo a sus características información selectiva del componente a analizar. Dentro del sector agrícola los más utilizados son los basados en anticuerpos, aptámeros o ácidos nucleicos para la detección de patógenos como bacterias, hongos y virus; y los enzimáticos para contaminantes vegetales. Debido a la sensibilidad que estos presentan es por lo que también requieren determinadas condiciones para poder realizar su correcto funcionamiento, lo que lo convierte en una limitante para entornos que se encuentran en constante cambio. En este contexto, se realiza una revisión de las diversas ventajas y desventajas de los tipos de biosensores, su aplicación en la detección de componentes de interés agrícola, al igual que una ejemplificación de los nuevos avances desarrollados para este sector.

Palabras clave: biosensor, detección, contaminantes vegetales, biomonitoreo, microorganismos patógenos

Introducción

Desde la antigüedad, el desarrollo de cultivos ha enfrentado una gran problemática que afecta la productividad de estos causando afecciones económicas, esta es la lucha contra las infecciones causadas por microorganismos dañinos hacia las plantas. A través de los años se han desarrollado diferentes productos para eliminar estos microorganismos; bacterias, hongos y virus; que afectan los cultivos, sin embargo, sus componentes también generan efectos adversos sobre la planta o inclusive su mal uso provoca que los microorganismos se vuelvan resistentes a estos. Además, el incremento de la industrialización y la emisión de contaminantes que son absorbidos en el suelo han generado un impacto en las plantas durante la absorción de nutrientes. Con lo anterior, resulta importante el desarrollo de herramientas de monitoreo y detección tanto de contaminantes como de patógenos para poder implementar las medidas adecuadas, así como también vías de investigación para el uso potencial de rasgos útiles de plantas para su aplicación en otras.

En la actualidad existen diversos métodos para su medición analítica, determinación de presencia y cuantificación; algunos de estos incluyen la cromatografía en gas (GC), cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), electroforesis y espectroscopía de masas. La problemática generada con algunos de estos radica en sus altos costos de análisis, gran cantidad de tiempo requerida para arrojar resultados, la calidad de la muestra debe ser con un alto grado de purificación por lo que requiere un mayor tratamiento previo, otras tienen un bajo rango de detección, incompatibilidad con ciertos compuestos y sobre todo se requieren personas especializadas para la utilización e interpretación del equipo (Samal et al, 2023); debido a ello para diferentes zonas no industriales, el llevar a cabo un análisis de contaminantes o patógenos presenta una gran dificultad por lo que se necesita una herramienta que sea eficaz, precisa, fácil de usar y de bajo costo que permita llevar a cabo la identificación.

El concepto de biosensor hace referencia a una herramienta tecnológica que, con el apoyo de algún componente de origen biológico, nos permite detectar y medir algún compuesto de interés. Estos componentes biológicos pueden

tratarse de bacterias, enzimas, anticuerpos, aptámeros o ácidos nucleicos. Los biosensores poseen sensibilidad, rapidez, precisión y confiabilidad, características que los diferencian de otros métodos utilizados para la detección de contaminantes (Farooq et al., 2022).

Cuando se habla de biosensores es muy común relacionarlo con algo que solo se ve en laboratorios, muy novedoso y fuera de nuestra cotidianidad o alcance, sin embargo, la aplicación de biosensores está más cerca de lo que pensamos, ¿has escuchado de las pruebas de embarazo o te han hecho medición de glucosa?, aunque no lo parezca, estos análisis instantáneos se realizan mediante el uso de biosensores (Polizzi, 2019).

La ventaja que ha proporcionado esta colaboración biológica y tecnológica es su gran aplicación en distintas áreas, dentro de los que se incluyen el sector salud, diagnósticos clínicos; el sector alimentario para análisis de calidad; el sector farmacéutico en el desarrollo de fármacos; ambiental y agrícola en cuanto a monitoreo de ciertos compuestos, entre otros (Farooq et al., 2022).

Un vistazo al funcionamiento de los biosensores

Los biosensores están conformados por 3 componentes (Figura 1); un elemento biológico, un transductor y un sistema electrónico. El elemento biológico se encarga de interactuar con la sustancia a analizar, usualmente ocurre a través de una reacción química; el transductor, como su nombre lo dice, se encarga de traducir o transformar el resultado de la interacción con el elemento biológico a un lenguaje interpretable y medible; finalmente el sistema electrónico toma el mensaje y proporciona un resultado que nosotros podemos observar (Patra et al., 2018) (Bhalla et al., 2016).

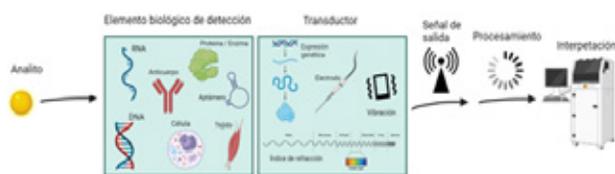


Figura 1. Diagrama de componentes y acción de un biosensor. Descripción de interacción del analito con elemento biológico de detección, interpretación por transductor, emisión de señal de salida procesamiento y presentación de resultado, Elaboración propia en Biorender.com

Las clasificaciones de biosensores están dadas de acuerdo al tipo de elemento biológico utilizado y al tipo de sistema eléctrico o señal emitida (Figura 2). Respecto a la primera, este puede estar conformado por proteínas, enzimas, células, anticuerpos, ADN (ácido desoxirribonucleico), ARN (ácido ribonucleico), aptámeros (ácidos nucleicos cortos con estructura tridimensional) o inclusive tejidos (Polizzi, 2019).

Las más utilizadas son las enzimas, proteínas con la capacidad de realizar reacciones químicas con una sustancia específica; y los anticuerpos que son proteínas que se unen a ciertos antígenos como sustancias químicas, toxinas o ciertos componentes encontrados en bacterias y virus para generar una respuesta inmune. Aquellos conformados por ácidos nucleicos ya sea ADN o ARN funcionan mediante la complementariedad de nucleótidos con los de la muestra a analizar, ofrecen alta especificidad ya que se verán favorecidas las muestras que encajen totalmente al molde del biosensor, pero no se descarta la posibilidad de unión de muestras con parcial complementariedad que no sean de interés dando un falso-positivo. El método de funcionamiento de los biosensores con aptámeros como elemento biológico se basan en la capacidad de este para modificar su estructura al haber presencia del analito que permita su unión; los que utilizan células o tejidos son mayormente utilizados para definir qué tan propenso es el analito de ser genotóxico (causar mutaciones en el material genético), esto está complementado a través del reconocimiento de activación de ciertas rutas metabólicas celulares tras verse afectado (Polizzi, 2019).

Los biosensores clasificados por el tipo de señal emitida se pueden dividir en 2 grupos; los que emiten señales eléctricas, sobre los que se incluyen los amperométricos, potenciomé-

tricos, de conductancia, de impedancia o piezoeléctricos; y los que emiten señales ópticas como lo es un cambio de color, fluorescencia, quimioluminiscencia, termoluminiscencia, entre otros. Unos de estos solamente nos dan una huella digital, es decir, indican si hay presencia o no de la sustancia de interés, mientras que otros pueden proporcionar una huella analógica en el que el resultado es proporcional o inversamente proporcional a la concentración que hay de la sustancia (Polizzi, 2019) (Sharafeldin & Davis, 2022).

De entre las clasificaciones de biosensor por su señal emitida, la eléctrica amperométrica es la más común en la que utiliza un electrodo para medir la oxidación o reducción de ciertos compuestos participantes en una reacción química que permite determinar o cuantificar el analito. El biosensor potenciométrico tiene la capacidad de medir la acumulación de carga o valor de potencial cuando no hay una corriente, este nos sirve para la medición de iones generados en el medio por el elemento biológico, así como el anterior, utiliza un electrodo más específico para la detección de especies iónicas; el conductimétrico mide las diferencias en propiedades de conducción del medio, es mayormente aplicado en combinación con un anticuerpo como elemento biológico. Aquellos basados en impedancia se guían en el fundamento de medición de la resistencia de una corriente alterna, de igual manera se aplica con anticuerpos o ácidos nucleicos para la detección de material complementario. Los piezoeléctricos son biosensores caracterizados por la medición del cambio tras aplicar cierto voltaje a un determinado material generando una vibración y consecuente unión de las moléculas a la superficie de este alterando su vibración (Polizzi, 2019).

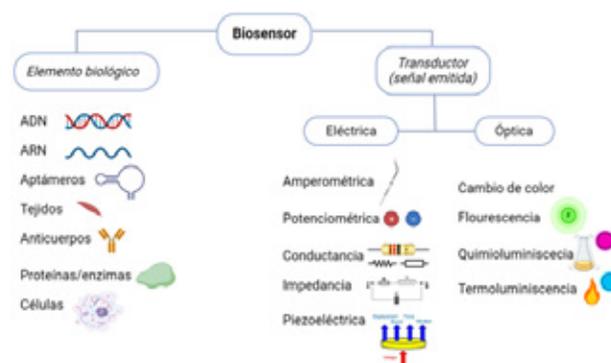


Figura 2. Clasificación de biosensor por elemento biológico y tipo de transductor. Elaboración propia en Biorender.com

Respecto a qué clasificación se encuentre el biosensor, el transductor puede estar formado por un electrodo para cuando se generan o detectan señales eléctricas; traducir mediante vibración; utilizar un índice de refracción para los resultados ópticos; o inclusive ser caracterizados por la expresión de ciertos genes de una célula.

Volviendo a las pruebas de embarazo, estas miden la hormona gonadotropina coriónica humana (GCH) secretada por el embrión durante el embarazo, la cual podríamos tomar como un antígeno, por lo que, mediante su unión al anticuerpo correspondiente, marcado con una molécula de color, y su corrimiento; se emite una señal óptica caracterizada por las franjas rosadas que nos indican su presencia (BBC, s.f.), clasificándose como un biosensor óptico digital conformado por anticuerpos (Kim et al., 2019).

Por su parte, el glucómetro es un biosensor enzimático, electrónico y analógico que mide la concentración de glucosa en sangre mediante una reacción química realizada por una enzima inmovilizada en la tira, con la glucosa generando un cambio eléctrico en el proceso el cual es detectado por el sensor, la intensidad será correspondiente a la cantidad de glucosa (Kim et al., 2019).

Biosensores en tu entorno natural

La aplicación de los biosensores ha sido fundamental para el biomonitoreo, es decir, la medición y detección cualitativa y cuantitativa de contaminantes presentes, nutrientes necesarios, respuestas metabólicas y microorganismos en cuerpos de agua, suelo y cultivos.

Biosensores en las plantas

La detección y monitoreo de contaminantes vegetales y microorganismos patógenos como lo son metales pesados (Pb, Cd), bacterias (*Pseudomonas syringae*, *Ralstonia solanacearum*, *Agrobacterium tumefaciens*), hongos (*Magnaporthe oryzae*, *Botrytis cinerea*, *Puccia* spp.) y virus (Tobacco mosaic virus, Tomato spotted wilt, Tomato yellow leaf curl) permite dar un tratamiento temprano y reducir la tasa de propagación de enfermedades.

Uno de los sectores más afectados con la presencia de estos microorganismos es la agricultura, ya que generalmente su identificación se da a través de los cambios morfológicos de la planta como manchas en hojas, pudrición de la raíz, descomposición de la fruta y marchitez, mediante al análisis de compuestos volátiles orgánicos (VOC) que la planta libera como mecanismo de defensa o la activación de diversas rutas metabólicas de respuesta, sin embargo, una vez observado estos cambios, la aplicación de un tratamiento se dificulta debido a la expansión del microorganismo (Kumar & Arora, 2020) (Khater, 2017), lo anterior hace que la productividad del cultivo disminuya y genere pérdidas económicas para los diferentes agricultores (Khater, 2017).

Además, el uso de plaguicidas ha sido una de las prácticas más comunes para la prevención, control y eliminación de estos microorganismos y plagas dañinos a los cultivos; con el desarrollo de resistencia microbiana o inclusive el aumento de demanda de alimento ha provocado un mayor uso de estos para alcanzar el mayor nivel de producción posible. La problemática con estas sustancias es que son persistentes (difícil de degradar) y bioacumulables (almacenan en organismos vivos), con el tiempo sus componentes aumentan la permeabilidad de los suelos y las aguas subterráneas donde si hay presencia de contaminantes, estos pueden alcanzar las profundidades causando un mayor daño e incrementando su permanencia en el ambiente. Algunas de estas sustancias incluyen a los organoclorados, compuestos orgánicos que en su estructura contienen moléculas de cloro (Cl) que atacan el sistema respiratorio; piretroides, derivados de piretrinas siendo este un compuesto formado por un ácido y un alcohol, atacan el sistema nervioso; carbamatos, formados por derivados de un compuesto denominado ácido carbámico, ataca el protoplasma celular; organofosfatos, compuestos orgánicos que contienen grupos con fósforo en su estructura, su método de ataque es físico; entre otros. Al penetrar los suelos se transfieren a los cultivos que termina en el progresivo consumo y daño humano, también llamado biomagnificación (Samal et al., 2023).

Además de esto, la visualización de la activación o inhibición de ciertas rutas metabólicas de plantas en respuesta a cambios en el entorno que sean de interés para su potencial apli-

cación a otras plantas e implementar su mejoramiento. Como ejemplificación se encuentra la tolerancia o adaptación de ciertas plantas al estrés salino; la cual está dada por sus vías metabólicas, contenido genético y rasgos físicos; el entendimiento de los anteriores y los efectos que causa esto en las plantas permiten la búsqueda de su implementación a otras plantas para generar variedades tolerantes al estrés salino que puedan ser cultivadas en esos tipos de suelos (Shena et al., 2023); mismo caso se puede llevar a cabo frente a estrés calórico, sobre todo con el incremento de temperaturas a consecuencia del cambio climático (Hendrix et al., 2022).

Es aquí donde entra la necesidad de un sistema que nos permita monitorear tanto el crecimiento microbiano como la detección en concentración o presencia de componentes dañinos provenientes de insecticidas en el ambiente. El uso de los biosensores presenta una oportunidad potencial ya que posee más especificidad, sensibilidad, rapidez y precisión comparado con otros métodos aplicados en este sector.

Un ejemplo de ello es el biosensor aptamérico aplicado para la detección de diazinona en muestras de frutas y vegetales, este es un insecticida que contiene compuestos organofosforados, en la agricultura es ampliamente utilizado para el control de plagas en el suelo, cultivos vegetales. El medio por el cual actúa es mediante la inhibición de la enzima acetilcolinesterasa involucrada en el envío de señales a los músculos provocando su mal funcionamiento y causando la muerte de los insectos. Debido a esto es considerado un potencial tóxico para la salud humana y los organismos del entorno, así como un contaminante ambiental. El biosensor desarrollado está conformado por ADN de una sola cadena (ssDNA) que se une selectivamente a ciertos componentes, esto es a lo que se denomina aptámero (ssDNA), la forma en la que expresa la señal es de forma óptica mediante la emisión de fluorescencia por la molécula fluoresceína, la cual su intensidad es medida y leída en un equipo. El proceso para determinar el contenido de diazinona se realiza con la obtención del extracto de alguna fruta o verdura, en este estudio se utilizó tomate, manzana y col, disolviendo estos en una mezcla de un compuesto orgánico y ácido clorhídrico (Tris-HCl), triturados con el uso de una licuadora, posterior a esto se centrifugó para

asentar los elementos sólidos y utilizar la parte líquida filtrada resultante. La presencia de diazinona retira un bloqueador contenido en el aptámero y es así como permite la emisión de fluorescencia, caso contrario en su ausencia, esto no ocurre (Can et al., 2022).

La detección de contaminantes y microorganismos que pueden estar presentes en cultivos de alimentos es de vital importancia para la prevención de enfermedades, el progresivo consumo de compuestos dañinos para el organismo, la disminución de pérdidas en las cosechas y el monitoreo futuro de su presencia.

Retos de los biosensores

A pesar de que por sus características confieren la capacidad de reaccionar y detectar ciertas sustancias aun cuando estas se encuentran en bajas cantidades, volviéndolos altamente sensibles, ofreciendo así repetibilidad y estabilidad; hay limitantes que interfieren en la capacidad de detección de los biosensores, como puede ser la complejidad de la muestra (Samal et al., 2023).

El tratamiento de la muestra es importante para eliminar cualquier componente que pueda interferir con el análisis de esta, debido a que puede tener una estructura similar, modificar las condiciones necesarias para la detección del biosensor o altere la composición intrínseca de la sustancia (Polizzi, 2019).

Dentro de los componentes del biosensor se encuentra limitación dependiendo del elemento biológico a utilizar, en ejemplificación con las enzimas, al realizar diversas reacciones químicas, pierden efectividad, pudiendo esto verse reflejado en un mayor margen de error de detección. Así como la selección del transductor a utilizar para la mejor interacción con el elemento biológico y la conexión con la señal que se desea recibir. El límite de detección indica cuál es la mínima y máxima cantidad confiablemente detectable por el biosensor, por lo que hay que considerar lo anterior de acuerdo a la muestra a tratar (Polizzi, 2019).

Otro de los retos principales de su uso radica en el tamaño de este, dificultando su movilidad en el mercado por lo que se han buscado alternativas en cuanto a los materiales con los que se construyen, uno de ellos son los nanomateriales, ya que estos por su escala na-

nométrica ofrecen una mejor unión al elemento biológico y por sus propiedades aumentan la sensibilidad de detección (Kumar y Arora, 2020) (Sharma, 2023), además de la capacidad de transportar biosensores con mayor facilidad a distintas zonas geográficas para realizar un análisis instantáneo, en este punto se debe considerar el coste del biosensor, ya que debe ser accesible para comercios locales e industriales, de igual manera debe ser aplicable para las diferentes cantidades y condiciones de análisis (Samal et al., 2023).

Actualmente, la aplicación de biosensores en distintas áreas está en desarrollo, incluyendo la comercialización de algunos dispositivos biosensores como MicroTox® M500 de la compañía Modern Water que sirve para la detección de diversos contaminantes mediante la utilización de células y emitiendo una señal óptica a través de quimioluminiscencia (Polizzi, 2019).

Conclusiones

Los biosensores representan una oportunidad de facilitar y mejorar la detección de microorganismos y contaminantes vegetales, así como una amplia gama de análisis en otros sectores debido a su alta sensibilidad, precisión, selectividad, bajo costo, facilidad de uso y diversidad de clasificación que se ajustan a las necesidades específicas de cada sector. Sin embargo, estos cuentan con limitantes que alteran su funcionabilidad, lo que lo hace una tecnología en desarrollo.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés financiero o personal alguno que haya influenciado el desarrollo del escrito.

Agradecimientos

Expresamos agradecimiento a la PhDs. Beatriz Espinoza Aquino, por el apoyo y revisión que nos brindó durante la elaboración de este escrito; por las sugerencias y dirección que permitieron el seguimiento adecuado del enfoque de este.

Referencias bibliográficas

BBC. (s. f.). Uses of monoclonal antibodies - Higher Tier - Monoclonal antibodies - Higher - AQA - GCSE Biology (Single Science) Revision - AQA - BBC Bitesize. <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zt8t3k7/revision/2>

Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N., & Estrela, P. (2016). Introduction to biosensors. *Essays in Biochemistry*, 60(1), 1–8. <https://doi.org/10.1042/EBC20150001>

Can, M. H. T., Kadam, U. S., Trinh, K. H., Cho, Y., Lee, H., Kim, Y., Kim, S., Kang, C. H., Kim, S. H., Chung, W. S., Lee, S. Y., & Hong, J. C. (2022). Engineering Novel Aptameric Fluorescent Biosensors for Analysis of the Neurotoxic Environmental Contaminant Insecticide Diazinon from Real Vegetable and Fruit Samples. *Frontiers in Bioscience - Landmark*, 27(3), 92. <https://doi.org/10.31083/j.fbl2703092>

Farooq, A., Bhat, K. A., Mir, R. A., Mahajan, R., Nazir, M., Sharma, V., & Zargar, S. M. (2022). Emerging trends in developing biosensor techniques to undertake plant phosphoproteomic analysis. *Journal of Proteomics*, 253, 104458. <https://doi.org/10.1016/J.JPROT.2021.104458>

Hendrix, S., Davila Frantzen, J. C., Ugalde, J. M., & Meyer, A. J. (2022). Unravelling plant responses to heat stress using genetically encoded biosensors. *Free Radical Biology and Medicine*, 189, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.06.110>

Khater, M., de la Escosura-Muñiz, A., & Merkoçi, A. (2017). Biosensors for plant pathogen detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 93, 72–86. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2016.09.091>

Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. In *Nature Biotechnology* (Vol. 37, Issue 4, pp. 389–406). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0045-y>

Kumar, V., Arora, K. (2020) Trends in nano-inspired biosensors for plants, *Materials Science for Energy Technologies*, Volume 3, Pages 255-273, ISSN 2589-2991, <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.10.004>

MIT School of Engineering (2011). How do glucometers work?. <https://engineering.mit.edu/engage/ask-an-engineer/how-do-glucometers-work/>

Samal, S., Mohanty, R. P., Mohanty, P. S., Giri, M. K., Pati, S., & Das, B. (2023). Implications of biosensors and nanobiosensors for the eco-friendly detection of public health and agro-based insecticides: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(5), e15848. <https://doi.org/10.1016/J.HELLYON.2023.E15848>

Polizzi, K. M. (2019). Biosensors. In *Comprehensive Biotechnology* (pp. 572–584). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00060-4>

Patra, J. K., Mahato, D. K., & Kumar, P. (2018). Biosensor technology-advanced scientific tools, with special reference to nanobiosensors and plant- and food-based biosensors. In *Nanomaterials in Plants, Algae and Microorganisms: Concepts and Controversies: Volume 2* (pp. 287–303). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811488-9.00014-7>

Sharafeldin, M., & Davis, J. J. (2022). Characterising the biosensing interface. *Analytica Chimica Acta*, 1216. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339759>

Sharma, S., & Dhady, D. K. (2023). Nano-inspired biosensors and plant diseases: recent advances and challenges. *Nanoparticles and Plant-Microbe Interactions*, 135–162. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90619-7.00002-3>

Sneha, M., Ravindranath, N. A., Murugesan, N., & Jayaraman, V. (2023). A biosensor for monitoring of salt stress in plants. *Organic Electronics*, 113, 106698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106698>