

AVANCES DE LA NANOTECNOLOGÍA Y APLICACIÓN DE NANOBIOSENSORES EN EL DIAGNÓSTICO MICROBIOLÓGICO DEL JET A-1

ADVANCES IN NANOTECHNOLOGY AND APPLICATION OF NANOBIOSENSORS IN THE MICROBIOLOGICAL DIAGNOSIS OF JET A-1

Silvia L. Acosta-Díaz ^{a*} (0000-0002-0140-2760)
Yamila Navarro Sosa^a (0000-0002-6053-2872)
Mary Elizabeh Sánchez Labrada^a (0009-0005-1817-8143)

^a Centro de Investigación del Petróleo, Calle Churruca No.481 e/Vía Blanca y Washington, Cerro, código postal 10600. La Habana Cuba.

^{a,*} sacosta@ceinpet.cupet.cu

Recibido: 17 de octubre de 2025;

Aceptado: 19 de diciembre de 2025;

RESUMEN

La contaminación microbiológica en combustibles de aviación representa una amenaza crítica para la seguridad operacional, la eficiencia energética y la integridad de los sistemas aeronáuticos. Esta contaminación puede provocar obstrucción de filtros, corrosión de componentes, formación de lodos y pérdida de rendimiento energético, generando riesgos operacionales y costos elevados de mantenimiento. Este artículo presenta una revisión exhaustiva del estado del arte sobre el uso de nanotecnología y nanobiosensores para la detección rápida, precisa y en tiempo real de microorganismos en turbocombustibles. Se describen las tecnologías de diagnóstico disponibles, los avances alcanzados en Cuba en el desarrollo de plataformas nanoestructuradas, y los desafíos regulatorios y toxicológicos asociados. Los nanobiosensores emergen como una solución tecnológica avanzada, capaz de detectar microorganismos y sus metabolitos de forma rápida, sensible y específica. Los resultados evidencian su potencial como herramienta estratégica para el monitoreo microbiológico en instalaciones de almacenamiento de combustibles, con implicaciones directas en la seguridad aérea y la sostenibilidad industrial.

Palabras clave: nanotecnología, nanobiosensores, turbocombustible, contaminación microbiológica.

ABSTRACT

Microbiological contamination in aviation fuels represents a critical threat to operational safety, energy efficiency, and the integrity of aeronautical systems. This contamination can cause filter blockage, component corrosion, sludge formation, and loss of energy performance, generating operational risks and high maintenance costs. This article presents a comprehensive review of the state of the art on the use of nanotechnology and nanobiosensors for the rapid, accurate, and real-time detection of microorganisms in jet fuels. The available diagnostic technologies, the progress achieved in Cuba in the development of nanostructured platforms, and the associated regulatory and toxicological challenges are described. Emerging nanobiosensors stand out as an advanced technological solution, capable of detecting microorganisms and their metabolites quickly, sensitively, and specifically. The results demonstrate their potential as a strategic tool for microbiological monitoring in fuel storage facilities, with direct implications for air safety and industrial sustainability.

Keywords: nanotechnology, nanobiosensors, jet fuel, microbiological contamination.



INTRODUCCIÓN

La aviación moderna depende de la calidad y estabilidad del combustible para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad de los sistemas aeronáuticos. Sin embargo, los combustibles como el Jet A-1 están expuestos a condiciones ambientales que favorecen la condensación de agua y, con ello, la proliferación de microorganismos. Esta contaminación microbiológica puede provocar obstrucción de filtros, corrosión de componentes, formación de lodos y pérdida de rendimiento energético, generando riesgos operacionales y costos elevados de mantenimiento (Hill, 2007).

Tradicionalmente, la detección de microorganismos en combustibles se ha realizado mediante cultivos microbiológicos, microscopía y técnicas moleculares como la del PCR (Reacción en cadena de la polimerasa), aunque efectivas, estas metodologías presentan limitaciones en cuanto a tiempo de respuesta, necesidad de personal especializado y dificultad para su implementación in situ (Turner, 2013). En este contexto, los nanobiosensores emergen como una solución tecnológica avanzada, capaz de detectar microorganismos y sus metabolitos de forma rápida, sensible y específica (D’Orazio, 2011).

La problemática de la contaminación microbiológica en combustibles, especialmente en el Jet A-1, ha sido ampliamente documentada por sus implicaciones en la seguridad aérea, el rendimiento operativo y los costos logísticos. En consecuencia, el desarrollo y aplicación de tecnologías basadas en nanotecnología para el monitoreo microbiológico representa una línea de investigación estratégica y de alto impacto.

El objetivo de este artículo es realizar una revisión del estado del arte sobre el uso de nanotecnología y nanobiosensores en el control microbiológico de combustibles de aviación, con énfasis en los avances alcanzados en Cuba y el potencial de estas tecnologías para su implementación en sistemas de monitoreo industrial.

La revisión bibliográfica se realizó en bases de datos científicas como PubMed, Web of Science y Google Scholar, utilizando términos clave como “nanobiosensores”, “contaminación microbiológica”, “diagnóstico en combustibles” y “nanotecnología”. Se seleccionaron artículos publicados entre 2007 y 2025, priorizando aquellos con aplicaciones en medicina, energía, medio ambiente y diagnóstico industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Contaminación microbiológica en combustibles de aviación

La acumulación de agua en los sistemas de combustible, favorecida por variaciones de humedad y temperatura, crea condiciones propicias para el crecimiento microbiano en aeronaves y tanques de almacenamiento. Desde la década de 1930 se ha documentado la capacidad de microorganismos como bacterias, hongos y levaduras para metabolizar hidrocarburos, generando lodos que causan obstrucciones y corrosión (Toledo, 2020).

En los años 60 se confirmó que comunidades microbianas pueden sobrevivir en presencia de combustibles, lo que transformó la biodegradación en un problema persistente para la industria aeronáutica. Estudios realizados revelaron niveles de contaminación superiores a 10^6 UFC·mL⁻¹, con presencia de géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Hormoconis resinae* (Schroeder, 2024).

Datos recientes muestran mejoras en los resultados de controles microbiológicos realizados a combustibles JET A-1 almacenados: en 2020, el 78 % de las muestras estaban libres de contaminación, frente al 45 % en 2019, lo que evidencia avances en los sistemas de filtración y almacenamiento implementados (Toledo, 2020). La IATA (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) recomienda el uso de kits comerciales y métodos de laboratorio para monitorear la calidad del Jet A-1 y prevenir fallos operacionales (IATA, 2022).

Kits comerciales para detectar contaminación

Existen diversos kits comerciales para la detección de la contaminación microbiológica en combustibles Jet A-1, cada uno con principios técnicos específicos. El MICROBMONITOR 2 y el EASYCULT TTC / EASICULT M permiten identificar bacterias, hongos y levaduras mediante el crecimiento visible de colonias sobre un medio nutritivo, facilitando evaluaciones rápidas tanto en el agua de fondo como directamente en el combustible (Muñiz, 2023).

El FUELSTAT™ resinae se especializa en detectar la actividad metabólica del hongo *Hormoconis resinae*, mientras que el HY-LiTE® Jet A-1 Fuel Test mide la actividad del ATP a través de unidades relativas de luz, siendo utilizado en el control de calidad del Jet A-1 importado (Muñiz, 2023).



El BugCount-Fuel es una innovación reciente con reactivos de larga vida útil sin refrigeración, actualmente en proceso de aprobación por la IATA. Su diseño busca facilitar el diagnóstico microbiológico en campo (Muñiz, 2024).

A pesar de su eficacia, la implementación de estos kits en Cuba enfrenta limitaciones económicas y logísticas. Además, los resultados deben interpretarse según las características técnicas de cada método, siendo el proveedor del kit la fuente principal de asesoramiento para su uso e interpretación adecuada (Muñiz, 2023).

Método de conteo en placas para la detección de la contaminación en el Jet A-1

El método de siembra directa en placas se utiliza para cuantificar microorganismos en el Jet A-1, tanto en la fase de combustible como en el agua libre. Se utilizan medios de cultivos específicos como el agar triptona soya para bacterias y agar extracto de malta para hongos siguiendo la norma ISO 15188: 2012, los resultados se expresan en UFC·mL⁻¹.

Este procedimiento se ajusta a la norma ASTM D6964-2020, que establece como aceptable la ausencia de crecimiento microbiano en el combustible y un límite de hasta 10⁵ UFC·mL⁻¹ en la fase acuosa. Además, permite obtener cultivos puros, lo que facilita la identificación taxonómica de los microorganismos presentes (ASTM, 2020).

Sin embargo, los métodos tradicionales como el cultivo en placa, la microscopía y la PCR presentan limitaciones en cuanto a tiempo de respuesta, necesidad de personal capacitado e infraestructura especializada. Estas restricciones han impulsado el desarrollo de tecnologías más eficientes como los nanobiosensores para el monitoreo microbiológico (Brown, 2019; Kim & Lee, 2021)

Nanotecnología

La nanotecnología se define como el conjunto de técnicas que permiten manipular la materia a escala nanométrica, es decir, en el rango de tamaño de átomos y moléculas (Taniguchi, 1974). Esta disciplina ha revolucionado múltiples sectores, desde la medicina hasta la electrónica, al permitir el diseño de materiales y dispositivos con propiedades únicas (Roco, Mirkin & Hersam, 2019).

El desarrollo científico ha impulsado la creación de diversos productos nanotecnológicos con aplicaciones industriales, médicas y ambientales. Entre ellos destacan los dendrímeros, moléculas ramificadas capaces de transportar y liberar sustancias específicas,

útiles en farmacología y agricultura (Rogers *et al.*, 2021).

El fago T4 sintético, inspirado en virus bacteriófagos, se investiga para terapia génica y control antimicrobiano. Los nanoalambres, recubiertos con receptores biológicos, modifican su conductividad al detectar microorganismos, siendo útiles en biosensores (Zhou & Wang, 2020).

Los nanobiosensores fotónicos emplean nanopartículas y puntos cuánticos para detectar agentes biológicos mediante radiación electromagnética. Las nanobombas, hechas de nanotubos de carbono, liberan energía al ser activadas por luz y calor, con aplicaciones terapéuticas en estudio (Kim & Lee, 2021).

Otros desarrollos incluyen nanosensores para monitoreo ambiental, nanomotores simulados por computadora para transporte molecular, y nanotransportadores que dirigen fármacos o ADN a células específicas, mejorando la eficacia terapéutica (Singh *et al.*, 2022).

Las nanopartículas, menores a 100 nm, se usan en productos farmacéuticos, textiles y lubricantes. Los nanoshells, con núcleo de silicio y recubrimiento metálico, se aplican en diagnóstico por imagen y terapia fototérmica (Hirsch *et al.*, 2003).

Los nanocompuestos, materiales híbridos con propiedades multifuncionales, se emplean en electrónica, textiles y productos antisépticos. Finalmente, los nanotubos de carbono destacan por su resistencia y ligereza, con aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz y electrónica, aunque su producción masiva aún enfrenta desafíos (Iijima, 1991; Dresselhaus *et al.*, 2001).

Medicina y Salud

La nanotecnología ha revolucionado la medicina mediante el desarrollo de herramientas diagnósticas, terapéuticas y de ingeniería de tejidos con alta precisión. En el diagnóstico, se emplean biosensores y nanopartículas como las de oro en pruebas rápidas para detectar enfermedades como cáncer, Alzheimer e infecciones con gran sensibilidad (Patel *et al.*, 2024).

En el ámbito terapéutico, se utilizan liposomas, polímeros y nanocápsulas para liberar fármacos directamente en células específicas, mejorando la eficacia y reduciendo efectos secundarios (Cheetham *et al.*, 2022). También se han incorporado puntos cuánticos y nanopartículas magnéticas en técnicas de imagen médica, aumentando la resolución en resonancia magnética, tomografía y ultrasonido.



Otros avances incluyen la hipertermia magnética con nanopartículas de óxido de hierro para destruir tumores, nanorobots de ADN para liberar medicamentos en sitios específicos, y micromotores capaces de realizar tareas dentro del torrente sanguíneo (Gao *et al.*, 2023).

Además, los nanomateriales antibacterianos como recubrimientos de plata y óxido de zinc previenen infecciones en dispositivos médicos. Las nanovacunas y vectores genéticos han sido clave en terapias contra enfermedades hereditarias y en vacunas de ARNm como las usadas contra la COVID-19 (Patel *et al.*, 2024). En ingeniería de tejidos, los nanomateriales actúan como andamios que imitan la matriz extracelular, favoreciendo la regeneración de piel, hueso y tejido nervioso (Gao *et al.*, 2023).

Electrónica y Computación

La nanotecnología impulsa avances significativos en electrónica y computación, permitiendo dispositivos más eficientes y potentes. Se investigan materiales emergentes como grafeno, nanotubos de carbono y compuestos 2D como el MoS₂, que superan al silicio en propiedades electrónicas, aunque enfrentan desafíos de escalabilidad e integración industrial (Schwierz, 2010; Novoselov *et al.*, 2016; Fiori *et al.*, 2014; Lanza, 2018).

En arquitectura de chips, tecnologías como los transistores FinFET y los diseños tipo chiplet han mejorado la densidad y rendimiento de los circuitos. Además, se exploran paradigmas disruptivos como la computación neuromórfica y cuántica, con potencial para superar los límites de la computación clásica (Auth *et al.*, 2012; Esmailzadeh *et al.*, 2011; Mead, 1990; Likharev, 1999).

En almacenamiento de datos, tecnologías como ReRAM y MRAM, basadas en nanoestructuras, ofrecen alta velocidad, bajo consumo energético y almacenamiento no volátil. Las investigaciones actuales buscan mejorar su densidad y fiabilidad (Waser *et al.*, 2009; Chappert *et al.*, 2007; Ielmini & Waser, 2016).

Energía y Materiales

En el sector energético, los nanomateriales han mejorado la eficiencia de celdas solares y permitido el desarrollo de baterías de alta capacidad y supercondensadores, esenciales para vehículos eléctricos y almacenamiento de energías renovables (Green *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024).

En construcción, se utilizan nanomateriales en recubrimientos y estructuras para mejorar el aislamiento térmico y la eficiencia energética de edificaciones (Bharath *et al.*, 2022). Además, la incorporación de nanopartículas en matrices poliméricas o metálicas ha dado lugar a materiales más resistentes, ligeros y duraderos, con propiedades como autolimpieza, resistencia a la corrosión y actividad antimicrobiana (Singh *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2022).

En el sector textil, se han desarrollado tejidos funcionales con propiedades como impermeabilidad, protección UV y efectos antibacterianos (Gupta *et al.*, 2023).

Agricultura y Alimentación

La nanotecnología ha introducido soluciones innovadoras en agricultura y alimentación. Los biosensores nanométricos permiten detectar con precisión nutrientes, plagas y enfermedades, mejorando la gestión de cultivos (Ogunwande *et al.*, 2023). La encapsulación de fertilizantes y pesticidas en nanopartículas permite su liberación controlada, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la eficiencia del uso de agroquímicos (Nadgouda *et al.*, 2022).

En la industria alimentaria, los nanomateriales se aplican en envases inteligentes que prolongan la vida útil de los productos, mejoran su conservación y previenen la contaminación (Bertolini *et al.*, 2024).

Medio Ambiente

La nanotecnología ofrece soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos ambientales actuales, desde la remediación de contaminantes hasta la prevención de su generación, contribuyendo a la sostenibilidad global (Roco, 2020).

En la remediación del agua, nanopartículas como óxido de grafeno y nanotubos de carbono permiten eliminar metales pesados, pesticidas y patógenos gracias a su alta área superficial. Las membranas nanofiltrantes separan selectivamente contaminantes, generando agua potable de alta calidad (Saleh *et al.*, 2019; Ang *et al.*, 2021).

Para el suelo, las nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) reducen metales pesados a formas menos tóxicas, mientras otras encapsulan y degradan contaminantes orgánicos, disminuyendo su toxicidad (Stefaniuk *et al.*, 2016; Bandosz, 2018).

En el aire, nanocatalizadores como el dióxido de titanio (TiO₂) degradan contaminantes mediante



fotocatálisis solar, y los nanofiltros capturan partículas en suspensión, mejorando la calidad del aire urbano e industrial (Schneider *et al.*, 2014; Baeza *et al.*, 2019).

En energías limpias, las nanoceldas solares basadas en puntos cuánticos y perovskitas aumentan la eficiencia de conversión. Los nanocompuestos en palas de aerogeneradores mejoran resistencia y durabilidad, y las baterías de nueva generación ofrecen mayor capacidad y menor tiempo de carga (Green *et al.*, 2014; Sarkar *et al.*, 2019; Goodenough & Park, 2013).

Para prevenir la contaminación, los nanorecubrimientos protegen superficies contra corrosión y desgaste. En alimentos, los nanomateriales mejoran la barrera de los envases, prolongando la vida útil y reduciendo el desperdicio. También se desarrollan materiales biodegradables que disminuyen los residuos plásticos (Bhushan, 2017; Duncan, 2011; Mohanty *et al.*, 2018).

Finalmente, los biosensores nanométricos permiten detectar contaminantes en aire y agua. El óxido de zinc (ZnO), por su bajo costo y propiedades únicas, se utiliza en sensores de gases tóxicos, fabricados mediante métodos físicos y químicos que optimizan su morfología y capacidad de detección (Heliyon, 2024).

Futuro de la Nanotecnología

La nanotecnología avanza hacia el diseño de estructuras átomo por átomo, con aplicaciones emergentes como nanobots capaces de realizar tareas complejas en el cuerpo humano o en entornos industriales. También se proyecta como clave en el desarrollo de dispositivos inteligentes y miniaturizados con funciones avanzadas (Feynman, 2021; Khademhosseini *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023). Actualmente, esta disciplina ha dejado de ser una promesa para convertirse en una realidad con aplicaciones concretas en sectores como medicina, energía, manufactura y electrónica. Su potencial para enfrentar desafíos globales como la purificación de agua y la mitigación de la contaminación ambiental ha despertado gran interés (Roco, 2021; Baker, 2022).

Las tendencias apuntan al desarrollo de materiales inteligentes y dispositivos altamente integrados. En particular, los nanomateriales multifuncionales diseñados a nivel atómico combinan propiedades como resistencia mecánica, conductividad eléctrica y autocuración, adaptándose a aplicaciones específicas (Ashby *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022).

En medicina, se prevé que nanorobots y nanosensores transformen el diagnóstico y tratamiento de

enfermedades como el cáncer, mediante terapias personalizadas, administración dirigida de fármacos y monitoreo fisiológico. La investigación actual se enfoca en superar retos de biocompatibilidad y seguridad clínica (Ferrari, 2005; Peer *et al.*, 2007; Wicki *et al.*, 2015; Lynch & Dawson, 2008; dos Santos *et al.*, 2019).

En energía, los nanomateriales mejoran el rendimiento de celdas solares, baterías y supercondensadores, con énfasis en materiales abundantes, menos tóxicos y más duraderos para aplicaciones sostenibles a gran escala (Poizot *et al.*, 2000; Tarascon & Armand, 2001; Goodenough & Park, 2013; Dunn *et al.*, 2011).

En manufactura, se desarrollan técnicas como la impresión 3D de nanomateriales y el autoensamblaje molecular, que permiten fabricar estructuras complejas con alta precisión. La investigación busca mejorar la velocidad, escalabilidad y reproducibilidad para su aplicación industrial (Whitesides & Grzybowski, 2002; De Volder *et al.*, 2013; Bishop, 2014).

Principio de Funcionamiento de los Nanobiosensores

Los nanobiosensores combinan materiales nanoestructurados con bioreceptores específicos como anticuerpos, enzimas, aptámeros o fagos, capaces de reconocer microorganismos o biomarcadores en una muestra. Estos bioreceptores se inmovilizan sobre superficies de nanomateriales como nanotubos de carbono o nanopartículas metálicas y, al interactuar con el analito objetivo, generan un cambio físico o químico que es detectado por un transductor. La señal resultante se amplifica y procesa para ofrecer una lectura cuantitativa o cualitativa sobre la presencia del microorganismo (González *et al.*, 2022; Miller *et al.*, 2021; Jackson *et al.*, 2020).

La alta selectividad de estos dispositivos se logra mediante el uso de bioreceptores específicos. Ejemplos destacados incluyen el sensor BioLuSiC para *E. coli*, sistemas con nanopartículas de oro para *Listeria* y *Salmonella*, plataformas de grafeno con inteligencia artificial para diagnóstico autónomo, dispositivos portátiles tipo lab-on-a-chip para *Pseudomonas aeruginosa*, y envases inteligentes con polímeros funcionalizados para control logístico de bacterias y hongos (González *et al.*, 2022).



Nanobiosensores: una Alternativa Prometedora en Cuba

Cuba ha comenzado a integrar activamente la investigación en nanobiosensores dentro de sus estrategias de innovación, aprovechando su experiencia en biotecnología. Instituciones como la Facultad de Química (FQ) y el Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica (IMRE) han desarrollado nanocompuestos funcionalizados capaces de reconocer microorganismos específicos, con aplicaciones en diagnóstico clínico y control microbiológico (Díaz & Gómez, 2017).

Se han implementado técnicas de modificación superficial de metales nobles como oro y plata mediante autoensamblaje molecular, utilizadas en la construcción de sensores y plataformas de inmovilización de biomoléculas. Además, el grupo BIOMAT ha explorado sistemas de liberación controlada de sustancias bioactivas mediante micropartículas de polímeros acrílicos y polisacáridos, orientados al desarrollo de formulaciones farmacéuticas más eficaces.

Cuba ha desarrollado una sólida infraestructura científica en el campo de la nanotecnología y la biotecnología. Instituciones como BIOMAT, CIGB, IMRE, CEAC y CIDEM han trabajado en la síntesis de nanocompuestos, plataformas de liberación controlada, sistemas de diagnóstico rápido y tecnologías de remediación ambiental (González, 2024).

Se han desarrollado liposomas multilaminares, partículas virales recombinantes (VLP), nanoconjugados mediante fluidos supercríticos y sistemas de peguiliación para mejorar la farmacocinética de proteínas terapéuticas (Hevia et al., 2016). Además, se han implementado tecnologías de medición como el microscopio de fuerza atómica (AFM) y la resonancia magnética molecular (RMI) para caracterización de biomoléculas y monitoreo terapéutico (Lobaina et al., 2022).

El Centro de Biomateriales de la Universidad de La Habana ha diseñado microsferas superparamagnéticas de quitosano como soporte para la inmovilización de tirosinasa, enzima capaz de degradar compuestos fenólicos (Peniche et al., 2002, 2005).

En la Facultad de Química y el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC), se han inmovilizado enzimas como lacasa sobre nanopartículas magnéticas para la biorremediación de

aguas residuales, y se ha investigado la adsorción de paracetamol sobre nanoestructuras de carbono.

Otros grupos de la Universidad de La Habana han trabajado con materiales nanoporosos como zeolitas, arcillas y sólidos mesoporosos como soportes para la liberación sostenida de fármacos y biomoléculas de interés, con fines terapéuticos y descontaminantes. Esta línea de investigación cuenta con más de dos décadas de experiencia, especialmente en el uso de zeolitas naturales.

En el Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), se han desarrollado procedimientos para la implantación, caracterización y estabilización de nanoestructuras multimetálicas complejas (Cu, Ag, Zn, Fe, entre otras) en zeolitas cubanas, con el objetivo de crear materiales con propiedades catalíticas y microbicidas de amplio espectro (Rodríguez-Fuentes et al., 2005).

Cabe destacar el trabajo del Laboratorio de Ingeniería Zeolítica del IMRE, que ha desarrollado dos líneas de productos basados en zeolitas naturales de gran tonelaje (fertilizantes zeolíticos y aditivos para la nutrición animal) y productos de alto valor intrínseco (materias primas para la industria farmacéutica, sistemas de depuración de agua potable y tratamiento de aguas residuales industriales). Algunos de estos productos han sido introducidos en la industria nacional o exportados a otros países, consolidando el potencial de la zeolita natural como recurso estratégico para el desarrollo sostenible (Rodríguez-Fuentes, 2015).

Tipos de biosensores aplicables al monitoreo de combustibles de aviación

- Enzimáticos: Detectan productos de degradación mediante reacciones catalizadas por enzimas (D'Orazio, 2011).
- Inmunoquímicos: Utilizan anticuerpos para detectar microorganismos y contaminantes químicos (Luppa et al., 2001).
- Microbianos: Emplean microorganismos vivos como sensores biológicos (Tohill, 2009).

La nanoestructuración de medios de cultivo mejora la sensibilidad y especificidad de los kits de detección rápida, al facilitar la captura, concentración y señalización de microorganismos en condiciones adversas (Hernández et al., 2022).



El desarrollo de nanomateriales plantea desafíos en cuanto a seguridad y regulación. En Cuba, centros como CENATOX, CETEX, CECMED y ORASEN han trabajado en la evaluación toxicológica de nanopartículas metálicas y magnéticas, así como en la formulación de marcos regulatorios para la nanomedicina (Jiménez, 2022).

El enfoque nacional se basa en el principio de precaución, priorizando una relación beneficio/riesgo favorable. La normalización y regulación son esenciales para la comercialización segura de productos nanoestructurados (Foladori, 2009).

Biosensores para el Monitoreo de la Calidad del Combustible de Aviones

La calidad del combustible aeronáutico es esencial para la seguridad y eficiencia de las aeronaves. Los biosensores ofrecen una herramienta rápida y sensible para monitorear parámetros críticos como contaminación microbiológica, presencia de agua, productos de oxidación y contaminantes químicos. Estos dispositivos permiten detectar en tiempo real

alteraciones que podrían comprometer el rendimiento del motor o la integridad del sistema de propulsión (D'Orazio, 2011; Turner, 2013; Hill, 2007; ASTM D3240, 2019; IP 386, 2019; Rasooly & Herold, 2008).

Existen distintos tipos de biosensores adaptables al monitoreo del Jet A-1. Los biosensores enzimáticos detectan agua y productos de degradación mediante reacciones catalizadas. Los inmunoquímicos emplean anticuerpos para identificar microorganismos y contaminantes específicos. Los microbianos utilizan microorganismos vivos para evaluar la toxicidad o biodegradabilidad del combustible, generando señales biológicas útiles para el diagnóstico (D'Orazio, 2011; Luppa *et al.*, 2001; Tothill, 2009).

Los biosensores ofrecen múltiples ventajas: permiten monitoreo en tiempo real, alta sensibilidad y especificidad, portabilidad para uso en campo, compatibilidad con sistemas automatizados y reducción de costos operativos gracias a su potencial de producción masiva.

CONCLUSIONES

La nanotecnología ha transformado múltiples sectores mediante la manipulación de la materia a escala nanométrica. Cuba presenta avances significativos en bionanotecnología, con impacto directo en el sistema de salud pública. Los nanobiosensores ofrecen una alternativa eficaz para el monitoreo microbiológico de combustibles de aviación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ashby, M. F., Shercliff, H., & Cebon, D. (2020). *Materials: Engineering, science, processing and design*. Elsevier.

ASTM D6469: 2020. Guía estándar para la contaminación microbiana en combustibles y sistemas de combustibles.

ASTM D3240 Standard Test Method for Undissolved Water in Aviation Turbine Fuels.

Auth, C., Allen, C., Carter, A., Das, A., Egley, D., Glassman, M. & Bohr, M. (2012). A 22nm high performance and low-power CMOS technology featuring fully depleted tri-gate transistors, self-aligned contacts and high-density MIM capacitors.

Ang, W. L., Lee, W. R., Ong, Y. K., & Ismail, A. F. (2021). Recent advances in nanomaterials for membrane-based water treatment. *Journal of Membrane Science*, 621, 118929.

Baeza, B., Vera, E., & Nerín, C. (2019). Nanomaterials for air quality improvement: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 1-20.

Baker, C. (2016). Portable biosensor devices. *Analytical Chemistry*, 88(15), 7500-7512.

Bandosz, T. J. (2018). *Activated carbon surfaces in environmental remediation*. Academic Press.

Bertolini, A., et al. (2024). Active packaging technologies: A review of nanomaterials in food preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 100-110.

Bishop, K. J. M. (2014). From molecules to materials: Self-assembly and directed assembly. *Accounts of Chemical Research*, 47 (6), 1755-1763.

Bhushan, B. (2017). *Nanocoatings for corrosion control*. Elsevier.

Bharath, R., et al. (2022). Nanomaterials for energy efficiency in buildings. *Construction Materials Journal*, 10(4), 207-215.

Brown, C. (2019). Limitations of traditional microbial detection methods. *Applied Microbiology*, 78 (4), 456-468.

Chen, L., (2024). Recent advances in nanomaterials for energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, 32, 102-115.



- Cheetham, A., Smith, J., & Patel, R. (2022). Advances in nanocarriers for targeted drug delivery: Liposomes, polymers, and nanocapsules. *Journal of Nanomedicine Research*, 14(2), 115–132. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00461-9>
- Chappert, C., Fert, A., & Van Dau, F. N. (2007). The emergence of spin electronics in data storage. *Nature Materials*, 6(11), 813–823.
- De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H., & Hart, A. J. (2013). Advanced nanoengineered fibers. *Science*, 339 (6119), 535-539.
- Díaz García, A. M., Felipe Gómez, A. M. (2017). Las investigaciones en el área de la bionanotecnología en Cuba. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 10(19), 37-71.
- Dos Santos, G. R., de Oliveira, P. P., Seabra, A. B., & Fachin, A. L. (2019). Biocompatibility of nanomaterials: An overview of in vitro and in vivo assays. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 18 (2), 351-369.
- Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Food Engineering*, 102(1), 1-39.
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the next generation. *Science*, 334 (6058), 928-935.
- Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Avouris, P. (Eds.). (2001). *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*. Berlin: Springer.
- D’Orazio, P. (2011). Biosensors in clinical chemistry. *Clinica Chimica Acta*, 412(19–20), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2011.06.004>.
- Esmailzadeh, H., Blem, E., Amaro, R. S., & Sankaralingam, K. (2011). Dark silicon and the end of multicore scaling. In *Proceedings of the 38th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)* (pp. 365-376). ACM.
- Feynman, R. P. (2021). *There is Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics*. Reimpresión conmemorativa. California Institute of Technology.
- Ferrari, M. (2005). Cancer nanotechnology: opportunities and challenges. *Nature Reviews Cancer*, 5 (3), 161-171.
- Foladori, G. (2009). Nanotecnología: entre la revolución y la incertidumbre. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 5(13), 11–30.
- Gao, W., Dong, R., Thamphiwatana, S., Li, J., Gao, W., Zhang, L., & Wang, J. (2023). Artificial micromotors in the bloodstream: From diagnosis to drug delivery. *Nature Reviews Materials*, 8(2), 85–102. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00461-9>
- Fiori, G., Bonaccorso, F., Iannaccone, G., Palacios, T., Neumaier, D., & Seabaugh, A. (2014). Electronics based on two-dimensional materials. *Nature Nanotechnology*, 9 (10), 768-779.
- González Ruiz, S. (2024). *Nanotecnología en la liberación farmacológica: Aplicaciones y avances*. Farmacia Ortopedia Cepeda. <https://farmaciaortopediacepeda.es/aplicaciones-de-nanotecnologia-en-liberacion-farmacologica>.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2014). Solar cell efficiency tables (Version 43). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(1), 1-9.
- Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506–514.
- González, M., Pérez, Y., & Rodríguez, L. (2022). Desarrollo de biosensores inmunoquímicos para la detección de bacterias en combustibles. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 45–52.
- Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176.
- Gupta, A., et al. (2023). Smart textiles using nanomaterials: A review.
- Hevia, R., Robaina, R., Hernández, A. (2016). Bases para el desarrollo e implementación de un marco regulador para nanomedicina en Cuba. *Anuario Científico CECMED*, año 14, enero-diciembre, 14-20.
- Heliyon (2024). Promising CO₂ gas sensor application of zinc oxide nanomaterials. *Heliyon*, 10(1), e12723.
- Hill, G. (2007). Microbial contamination in aviation fuel. *Fuel Quality Journal*, 12(3), 45–52.
- Hernández, L., Martínez, A., & Díaz, R. (2022). Nanoestructuración de medios de cultivo para detección microbiana. *Revista Cubana de Nanotecnología*, 6(1), 33–41.
- Hirsch, L. R., Stafford, R. J., Bankson, J. A., Sershen, S. R., Rivera, B., Price, R. E., Hazle, J. D., Halas, N. J., & West, J. L. (2003). Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(23), 13549–13554. <https://doi.org/10.1073/pnas.2232479100>
- IATA (International Air Transport Association), 6th Edition. (2022). *Guidance Material on Microbial Contamination in Aircraft Fuel Tanks*.



- ISO IS 15188: 2012 (2012). Water quality — general guidance on the enumeration of microorganisms by culture.
- IP 386: 2019. Standard Test Method for Determination of Water in Crude Petroleum by Coulometric Karl Fischer Titration.
- Iijima, S. (1991). Synthesis of carbon nanotubes. *Nature*, 354(6348), 56–58.
- Ielmini, D., & Waser, R. (2016). Resistive switching: From fundamentals to applications. *Materials Today*, 19 (1), 11-22.
- Jackson, M., & Lee, J. (2020). Enzyme-based biosensors for environmental monitoring. *Sensors*, 20(3), 789. <https://doi.org/10.3390/s20030789>
- Jiménez Herrera, L. G. (2022). Desarrollo, aplicaciones y desafíos de la nanomedicina. *Infodir*, 38(2), 1–12.
- Kim, S., & Lee, H. (2021). Advanced detection technologies for microbial contamination. *Critical Reviews in Microbiology*, 47 (5), 567-580.
- Khan, Y., et al. (2022). Nanocoatings for corrosion protection: A review. *Coatings*, 12(5), 123-130.
- Khademhosseini, A., et al. (2024). Nanobots and their applications in medicine. *Nano Today*, 39, 100-110.
- Lanza, M. (2018). A review on resistive switching in high-k dielectrics: A nanoscale point of view using conductive atomic force microscopy. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 122, 1–41.
- Likharev, K. K. (1999). Single-electron devices and their applications. *Proceedings of the IEEE*, 87 (4), 606-632.
- Lobaina Rodríguez, M., et al. (2022). Diagnóstico rápido mediante plataformas nanoestructuradas. *Revista de Ciencia y Tecnología de Materiales*, 8(2), 55–63.
- Luppa, P. B., Sokoll, L. J., & Chan, D. W. (2001). Immunosensors principles and applications. *Clinica Chimica Acta*, 314(1–2), 1–26. [https://doi.org/10.1016/S0009-8981\(01\)00645-5](https://doi.org/10.1016/S0009-8981(01)00645-5)
- Lynch, I., & Dawson, K. A. (2008). Protein-nanoparticle interactions. *Nano Today*, 3 (1-2), 40-47.
- Mead, C. (1990). Neuromorphic electronic systems. *Proceedings of the IEEE*, 78(10), 1629–1636
- Miller, Q., et al. (2021). Phage-based nanobiosensors for selective bacterial detection. *Applied and Environmental Microbiology*, 87 (2), e02345-20.
- Muñiz, J.L. (2023). *Anatomía de la Filtración para el combustible de aviación*. Cap. 1.
- Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A., & Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353 (6298), aac9439.
- Nadgouda, M. N., Patil, S., & Kulkarni, R. (2022). Nanoencapsulation of agrochemicals: Controlled release strategies for sustainable agriculture. *International Journal of nanotechnology in Agriculture*, 8(3), 101–118. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Ogunwande, G. A., Omotosho, O., & Adekalu, K. O. (2023). Nanotechnology-enabled biosensors for precision agriculture: Advances and applications. *Journal of Agricultural Nanotechnology*, 12(1), 45–62. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Peniche, H., Peniche, C. de La Campa, A., Díaz Castañón, S. (2002). Preparación y caracterización de microesferas magnéticas de poliestireno. *Revista Iberoamericana Polímeros*, 3(1).
- Peer, D., Karp, J. M., Hong, S., Faroohar, F., Peer, D., Kolhar, P. & Langer, R. (2007). Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Nature Nanotechnology*, 2 (12), 751-760.
- Poizot, P., Laruelle, S., Grugeon, S., Dupont, L., & Tarascon, J. M. (2000). Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries. *Nature*, 407 (6803), 496-499.
- Rodríguez-Fuentes, G., et al. (2005). Zeolitas naturales cubanas: aplicaciones en la industria y el medio ambiente. *Revista Cubana de Química*, 21(2), 67–74.
- Roco, M. C., Mirkin, C. A., & Hersam, M. C. (2019). Nanotechnology research directions for societal needs in 2020. *Springer Science & Business Media*.
- Roco, M. C. (2020). Nanotechnology innovation: Past and future near term.
- Rogers, A., Martínez, L., & Chen, Y. (2021). Dendrimers as nanocarriers in pharmacology and agriculture: Advances and perspectives. *Journal of Nanotechnology Applications*, 15(2), 123–140. <https://doi.org/10>
- Roco, M. C. (2021). Principles and methods that changed nanotechnology research: A personal perspective. *Nature Nanotechnology*, 16(7), 720–723.
- Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 5 (7), 487-496.
- Schroeder, B., A. L., Reed, A. M., Radwan, O., Bowen, L. L., Ruiz, O. N., Gunasekera, T. S., & Hoffmann, A. (2024). *Identification of Pseudomonas protegens and Bacillus subtilis Antimicrobials for Mitigation of Fuel Biocontamination*. *Biomolecules*, 15(2), 227.



- Whitesides, G. M., Grzybowski, B. (2002). Self-assembly at all scales. *Science*, *x* 295 *x* (5564), 2418-2421.
- Wicki, A., Bratulic, S., Vonarburg, C., Hallam, C., & Petri-Fink, A. (2015). Cell entry mechanisms of engineered nanoparticles: The Trojan horse strategy. *Pharmaceutical Research*, *32* (5), 1291-1314.
- Zhang, Y., Nayak, S., Hong, H., & Cai, W. (2012). Multifunctional nanocarriers for cancer targeted imaging and therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *64* (6), 485-498
- Zhang, X., Shi, Q., Chen, C., Wang, C., & Wang, S. (2022). Design and application of multifunctional nanomaterials. *Materials Chemistry Frontiers*, *6* (1), 63-80.
- Zhou, L., & Wang, H. (2020). Nanostructured biosensors for pathogen detection. In X. Zhang (Ed.), *Advances in Nanobiotechnology* (pp. 85-110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-98-14-98888-8_4
- Waser, R., Dittmann, R., Staikov, G., & Szot, K. (2009). Redox-based resistive switching memories nanoionics, electrochemistry, and memristive functions. *Advanced Materials*, *21* (26), 2632-2663.
- Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of nanotechnology. *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, Tokyo, Japan.
- Tothill, I. E. (2009). Biosensors for pollutant monitoring in water and wastewater. *Sensors*, *9*(11), 9446-9462. <https://doi.org/10.3390/s91109446>.
- Toledo, J. (2020). Bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos. *Revista Cienc.*, vol. 24, no. 2, Cali.
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, *42*(8), 3184-3196. <https://doi.org/10.1039/C3CS35486F>.
- Patel, S., et al. (2024). Optical nanobiosensors for microbial detection: A comprehensive review. *Biosensors and Bioelectronics*, *150*, 111956.
- Singh, A. V., et al. (2022). Gold Nanoparticles for Sensing Applications.
- Saleh, T. A., Gondal, M. A., & Drmosh, Q. A. (2019). Graphene-based materials for water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, *371*, 586-603.
- Sarkar, A., Banerjee, S., & Ganguly, R. (2019). Nanocomposites for wind energy applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *102*, 263-274.
- Schneider, J., Bahnemann, D. W., Ye, J., Zhou, J., Zhang, L., & Dong, W. (2014). Advances in TiO₂ photocatalysis: Nanostructure, doping, co-catalysts, and mechanism. *Chemical Reviews*, *114*(19), 9919-9986.
- Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, *5*(7), 487-496.
- Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., & Kuźniar, A. (2016). Application of nanoscale zero-valent iron for soil remediation: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(10), 9413-9428.

En este artículo no existe conflicto de interes entre los autores.

