

**Nanosensores colorimétricos para la detección rápida de pesticidas organofosforados en  
sistemas acuosos: materiales y caracterización**

Julissa Montoya Luna

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías  
Química

**Nanosensores colorimétricos para la detección rápida de pesticidas organofosforados en  
sistemas acuosos: materiales y caracterización**

Julissa Montoya Luna

TRABAJO DE GRADO

Requisito final para optar al título de Químico

Director:

M. Sc. Johny Roberto Rodríguez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías  
Química

## Tabla de Contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción .....	8
Definición del problema .....	10
Justificación .....	12
Objetivos.....	14
Objetivo general:.....	14
Objetivo específico: .....	14
Metodología .....	15
Fase 1. Identificación del problema a través de la revisión de diversas fuentes de información. ....	15
Fase 2. Búsqueda y revisión de artículos e investigaciones académicas sobre contaminantes en sistemas acuíferos y aplicaciones nanotecnológicas .....	16
Fase 3. Revisión de las diversas aplicaciones de nanosensores colorimétricos como alternativa de detección rápida de OP (organofosforados). ....	17
Fase 4. Elaboración de un documento de consulta sobre las diversas aplicaciones y usos de los nanosensores colorimétricos.....	17
Contaminantes en Sistemas Acuíferos.....	18
Un punto de partida en la industria agrícola .....	18
Contaminantes en sistemas Acuáticos .....	21
Sistemas Acuíferos y contaminantes.....	24
Pesticidas.....	27

	4
Clasificación y usos .....	28
Pesticidas Organofosforados OP.....	31
Nanotecnología .....	33
Definición.....	33
Nanomateriales.....	36
Tipos de Nanopartículas y usos .....	38
Nanosensores utilizados para la Detección de Contaminantes .....	39
Nanosensores químicos fluorescentes.....	43
Sensores químicos colorimétricos.....	45
Sensores electroquímicos .....	46
Técnicas de Caraterización, Materiales y Métodos de Síntesis de Nanosensores Colorimétricos para detección de Pesticidas OP .....	48
Química heterogénea y química homogénea .....	48
Síntesis de NPs para la elaboración de nanosensores .....	49
Nanomateriales para la detección y remediación de pesticidas .....	53
Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Nanosensores Colorimétricos.....	59
Aplicación de la Nanotecnología al desarrollo de los Nanosensores Colorimétricos en los Sistemas Acuosa.....	61
Conclusiones.....	63
Anexos .....	67
Referencias.....	91

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Diagrama metodológico la revisión monográfica sobre Nanosensores Colorimétricos para la detección rápida de pesticidas organofosforados en sistemas acuosos</i> .....	15
<b>Figura 2.</b> <i>Clasificación de los pesticidas</i> .....	28
<b>Figura 3.</b> <i>Estructura de los Carbamatos</i> .....	29
<b>Figura 4.</b> <i>Clasificación OMS de pesticidas. DL (Dosis Letal)</i> .....	30
<b>Figura 5.</b> <i>Algunos OP clase Ia-sumamente peligrosos</i> .....	31
<b>Figura 6.</b> <i>Concepto de Nanotecnología</i> .....	34
<b>Figura 7.</b> <i>Técnicas de síntesis de nanomateriales</i> .....	35
<b>Figura 8.</b> <i>Clasificación esquemática de Nanomateriales</i> .....	37
<b>Figura 9.</b> <i>Clasificación de los nanosensores</i> .....	41
<b>Figura 10.</b> <i>Mecanismo de sensado y estructura general de marcadores fluorescentes</i> .....	44
<b>Figura 11.</b> <i>Proceso sol-gel</i> .....	51
<b>Figura 12.</b> <i>Nanopartículas para detección, degradación y eliminación de pesticidas</i> .....	54

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Clasificación CEs</i> .....	22
<b>Tabla 2.</b> <i>Tipos de contaminantes</i> .....	23
<b>Tabla 3.</b> <i>Tipos de Acuíferos más representativos.</i> .....	25
<b>Tabla 4.</b> <i>Tipos de sensores químicos (señal primaria que transforma) y especies que pueden analizar.</i> .....	42

## Resumen

Una de las estrategias de desarrollo competitivo en el sector agrícola y alimenticio ha sido el uso de agentes químicos como los pesticidas organofosforados OP que aceleran y mejoran los procesos de producción y sustentabilidad de cosechas. Sin embargo, el uso excesivo de estos y la insuficiente normativa para su control a nivel nacional e internacional produce un impacto ambiental y de salud negativo. Sumado a esto, el uso de técnicas analíticas avanzadas y costosas para su determinación, limitan el control de estas sustancias a instituciones con capacidad instalada, dejando de lado a productores y pequeñas empresas. De esta manera, el desarrollo y aplicabilidad de nuevas tecnologías como la “nanotecnología” ha generado alternativas para innovar los procesos de detección de manera rápida y menos costosos a través del diseño de nanosensores. En esta monografía se exponen investigaciones de nanosensores colorimétricos con potencial aplicación en la detección de pesticidas organofosforados en sistemas acuosos, involucrando la estructura, composición y proporciones de los materiales y sus nanoestructuras, variables de importancia para definir su aplicabilidad. Se inicia con revisión en el marco de los contaminantes presentes en estos sistemas, definiciones sobre pesticidas, importancia de la nanotecnología y tipos de nanomateriales utilizados; se continúa con la revisión de varias investigaciones y ensayos realizados sobre nanosensores colorimétricos, técnicas de caracterización y materiales, ventajas y desventajas, y finalmente se evidencia como el desarrollo de la nanotecnología ha contribuido en la creación de técnicas in situ que podrían constituirse en tipos de análisis químicos accesibles y con bajos costos.

**Palabras clave:** Nanotecnología, Pesticidas Organofosforados, Nanosensores Colorimétricos, Nanopartículas.

## Abstract

One of the competitive development strategies in the agricultural and food sector has been the use of chemical agents such as OP organophosphate pesticides that accelerate and improve the production processes and the sustainability of crops. However, the excessive use of these and the insufficient regulations for their control at the national and international levels produce a negative environmental and health impact. Added to this, the use of advanced and expensive analytical techniques for their determination, limit the control of these substances to institutions with installed capacity, leaving aside producers and small businesses. In this way, the development and applicability of new technologies such as "nanotechnology" has generated alternatives to innovate detection processes quickly and less expensively through the design of nanosensors. In this monograph, investigations of colorimetric nanosensors with potential application in the detection of organophosphate pesticides in aqueous systems are exposed, involving the structure, composition and proportions of the materials and their nanostructures, important variables to define their applicability. It begins with a review of the pollutants present in these systems, definitions of pesticides, the importance of nanotechnology and the types of nanomaterials used; It continues with the review of various investigations and tests carried out on colorimetric nanosensors, characterization techniques and materials, advantages and disadvantages, and finally it is shown how the development of nanotechnology has contributed to the creation of in situ techniques that could become types of accessible and low-cost chemical analysis.

**Keywords:** Nanotechnology, Organophosphate Pesticides, Colorimetric Nanosensors, Nanoparticles.

## Introducción

En esta monografía se pretende realizar una revisión bibliográfica sobre los avances de la nanotecnología en Nanosensores Colorimétricos como un método rápido para la detección de pesticidas organofosforados en sistemas acuíferos, producto de las diferentes prácticas desarrolladas por la industria.

El desarrollo de lo anteriormente planteado busca satisfacer objetivos como la identificación de los diferentes tipos de sensores utilizados para la detección de pesticidas organofosforados (OP), técnicas de caracterización, materiales, métodos de síntesis de nanosensores colorimétricos, análisis de ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de nanosensores colorimétricos desarrollados a la fecha a través del uso de la química heterogénea y/o homogénea, el uso de la nanotecnología y su finalidad en la mejora de los sistemas existentes.

Estos objetivos dan cuenta de una revisión bibliográfica de tipo analítico, que busca brindar una explicación y comprensión sobre la importancia de la nanotecnología como una ciencia que además de brindar avances en el desarrollo de nuevos materiales en la industria, también sea relacionada como una alternativa para la remediación e identificación de contaminantes en los sistemas acuíferos que beneficien la humanidad. Grandes investigaciones se han desarrollado a partir de finales del siglo XIX en cuanto al avance de la elaboración de nanomateriales y nanopartículas capaces de realizar detecciones in situ y rápidas de pesticidas en la industria agrícola y alimentaria, que proporcionan a la pequeña y grande industria herramientas poco costosas, que pueden constituirse en un factor de control y seguimiento a sus productos y calidad de estos. En esta revisión se busca introducir al lector en los diferentes conceptos sobre nanomateriales, las investigaciones realizadas sobre el desarrollo de

nanosensores, la importancia de los sistemas acuíferos para la humanidad, así como el riesgo que afrontamos a futuro si estos sistemas subterráneos continúan recibiendo contaminantes sin realizar un control efectivo.

La presente monografía se concentra en cuatro capítulos. En el primero *Contaminantes en Sistemas Acuíferos*, se presentan varias definiciones sobre los diferentes sistemas acuíferos, la importancia de estos para la humanidad, conceptos sobre pesticidas, clasificación y usos. En el segundo *Nanotecnología*, se describen los diferentes tipos de nanomateriales y sus usos, así como métodos de síntesis de algunas nanopartículas (NPs). En el tercero *Nanosensores utilizados para la detección de contaminantes*, se realiza una breve mirada sobre los nanosensores, y en el cuarto *Nanosensores Colorimétricos para la detección de OP* donde se realiza la descripción y análisis de varias investigaciones sobre nanosensores colorimétricos y donde se finaliza con una tabla que trata de definir estas investigaciones y nanomateriales utilizados para la obtención de nanopartículas y su obtención.

Se espera que este texto sirva además de introducción al conocimiento y definición de los diferentes tipos de nanosensores utilizados para detección de pesticidas y la nanotecnología, sea un material de referencia bibliográfica que proporcione claridad y conciencia sobre la importancia de los sistemas acuíferos, la afectación al medio ambiente y las diferentes alternativas de remediación y detección que proporcionan el desarrollo de los nanosensores y por ende la nanotecnología.

### **Definición del problema**

El desarrollo industrial y el avance tecnológico permitieron a la sociedad mejorar la producción y comercialización de productos y materiales que satisfacen las necesidades más próximas de los seres humanos; sin embargo, en el transcurrir de la historia y con la aparición de la globalización y sus altas demandas de calidad en productos, se desarrollaron técnicas y compuestos químicos que influyeron directamente en la contaminación ambiental de fuentes hídricas, suelos y aire. Estas necesidades buscan satisfacer la demanda y oferta agrícola, con productos alimenticios de altos estándares y calidad para su consumo, conduciendo al tratamiento de los cultivos para controlar plagas, como insectos, artrópodos, vertebrados y arvenses, además de agentes patógenos que provocan enfermedades a los cultivos, como hongos, virus y bacterias; es así, como surge la necesidad de desarrollar técnicas de control a través de pesticidas, para reducir los daños ocasionados por estas plagas. Sin embargo, la aplicación de estas sustancias químicas con el trasegar del tiempo fueron causantes de efectos nocivos para la salud humana y su ecosistema (Lira-Saldivar et al., 2016).

Dentro del grupo de pesticidas utilizados para el control de plagas se encuentran los compuestos organofosforados, llamados insecticidas neurotóxicos ya que actúan directamente sobre la transmisión del impulso nervioso en insectos y personas, y aunque están enmarcados dentro de las categorías de clases toxicológicas III y IV, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) que son de bajo riesgo para los humanos, se han constituido en factores toxicológicos que inciden directamente en la contaminación ambiental y la salud humana cuando se utilizan en exceso (Fernandez et al., 2010), debido a esto es importante el desarrollo de metodologías y técnicas para la detección, caracterización e igualmente informar sobre las cantidades utilizadas y los riesgos de estos en el medio en el que se aplican. Actualmente existen

técnicas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC según sus siglas en inglés), la espectroscopia de masas, entre otras, que permiten muestrear diversas matrices y hacer un control de la concentración de estos pesticidas. Sin embargo, estos tienen la desventaja de ser métodos costosos y de poca accesibilidad a los pequeños productores y comercializadores de productos agrícolas (Walia & Acharya, 2014).

La nanotecnología como nueva tecnología para el desarrollo de sensores colorimétricos se presenta como alternativa de detección rápida de pesticidas organofosforados. Pero dado que es relativamente nueva, las investigaciones acerca de la síntesis, caracterización y desarrollo de nanosensores son dispersas; de ahí, la importancia de que la incursión de la química en el sector agrícola además de provocar un desarrollo en cuanto a producción masiva de alimentos y control de plagas, se muestre también como una alternativa de detección y remediación a través del uso de nanomateriales, específicamente en sistemas acuíferos, exponiendo la aplicación de la química heterogénea y homogénea que permita articular y proveer sistemas para la recuperación de nanopartículas (NPs), su reutilización y a su vez la generación de una respuesta eficiente para la detección del compuesto de interés en matrices complejas. Por lo tanto, se hace necesario dar a conocer los avances en nanosensores colorimétricos desarrollados hasta la fecha para la detección de pesticidas organofosforados, las ventajas y desventajas de su potencial de aplicación a través de una compilación y revisión bibliográfica, que exponga los materiales utilizados para su diseño y técnicas de caracterización para su determinación como nanosensores.

## Justificación

La nanotecnología se encarga de estudiar y manipular la materia a escala nanométrica; sin embargo, las propiedades a escala nano son muy diferentes a las trabajadas en escalas superiores. El diseño de nanopartículas ha permitido el desarrollo de nuevas tecnologías para la medicina, farmacia y alimentos (Andrada, 2012).

En la agroindustria el uso de pesticidas ha generado una gran problemática debido a la bioacumulación de las sustancias químicas utilizadas para tal fin, las cuales tienen efectos secundarios nocivos en los seres vivos y sus ecosistemas expuestos de manera constante a ellos. Algunos de estos compuestos son los organofosforados (OP), ésteres del ácido fosfónico que inhiben a la acetilcolinesterasa (Carmona, 2010), que es una enzima que hidroliza rápidamente a la acetilcolina (ACh), provocando la interrupción normal de los impulsos nerviosos, causando la muerte por envenenamiento, con asfixia y fallo respiratorio; algunos de estos ésteres fosfóricos se utilizan como pesticidas en el área agrícola y son especies reactivas y tóxicas (Carmona, 2010). Los OP en su forma pura son líquidos incoloros, en productos elaborados se tornan pardos y con olor a frutas, se hidrolizan lentamente en agua, pero al aumentar el pH lo hacen rápidamente. Un ejemplo de OP es el glifosato, el cual se introdujo en Colombia como una herramienta de control de cultivos relacionados con la producción de narcóticos, considerándose el de mayor uso a nivel mundial como pesticida no selectivo para erradicar plantas no deseadas, siendo así uno de los agentes contaminantes y generador de varias enfermedades (Cortina et al., 2017).

Existen técnicas analíticas comúnmente utilizadas en laboratorios de gran capacidad para la detección de pesticidas organofosforados, utilizando plataformas analíticas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés), cromatografía de

gases, espectrometría de masas, entre otras (Walia & Acharya, 2014). El uso de estas técnicas representa altos costos, tiempos extensos para el procesamiento de muestras, además de contratación de personal calificado en el manejo de equipos y realización de estos análisis. A través del avance de la nanotecnología y la concientización de la conservación del medio ambiente, el desarrollo y aplicación de nanosensores en la detección de analitos, se ha permitido el adelanto de varias investigaciones científicas sobre estas metodologías, el uso, generación y manipulación de nanopartículas, a través de la implementación de diferentes técnicas y materiales que a su vez, han contribuido al desarrollo de sistemas de detección colorimétricos, electroquímicos y fluorescentes de compuestos químicos como pesticidas organofosforados (OP) (Saini et al., 2017a). Aunque existen investigaciones acerca del uso de sensores, biosensores, y técnicas de detección nanotecnológicas, aún no se tiene información centralizada acerca del uso de los nanosensores o la implementación de nanotecnología con sensores de detección rápida para los OP en sistemas acuíferos, que permitan mostrar de una manera sencilla y simple, diferentes estudios y aplicaciones (Saini et al., 2017a). En este trabajo se busca revisar los avances en nanosensores para la identificación de compuestos organofosforados, la incursión de la nanotecnología para la obtención de nanosensores colorimétricos, las principales técnicas de análisis y materiales utilizados para su desarrollo; y la formulación de alternativas basadas en la química heterogénea que permitan su detección en matrices acuosas (Kumar et al., 2015), lo anterior a partir de la lectura y búsqueda de información en libros, artículos de investigación, tesis, recursos de internet, entre otros, que permitan llegar al desarrollo de los objetivos planteados.

## Objetivos

### **Objetivo General:**

Desarrollar una revisión bibliográfica acerca de nanosensores colorimétricos para la detección de compuestos organofosforados a través de la recopilación de información sobre los materiales de síntesis, técnicas de análisis y caracterización, ventajas y desventajas de los sistemas desarrollados a la fecha.

### **Objetivo Específico:**

Identificar los tipos de sensores utilizados para la detección de pesticidas en compuestos organofosforados.

Identificar las técnicas de caracterización, materiales y métodos de síntesis de nanosensores colorimétricos para la detección de compuestos organofosforados.

Analizar las ventajas y desventajas de los sistemas de nanosensores colorimétricos desarrollados a la fecha a través del uso de la química heterogénea y/o homogénea.

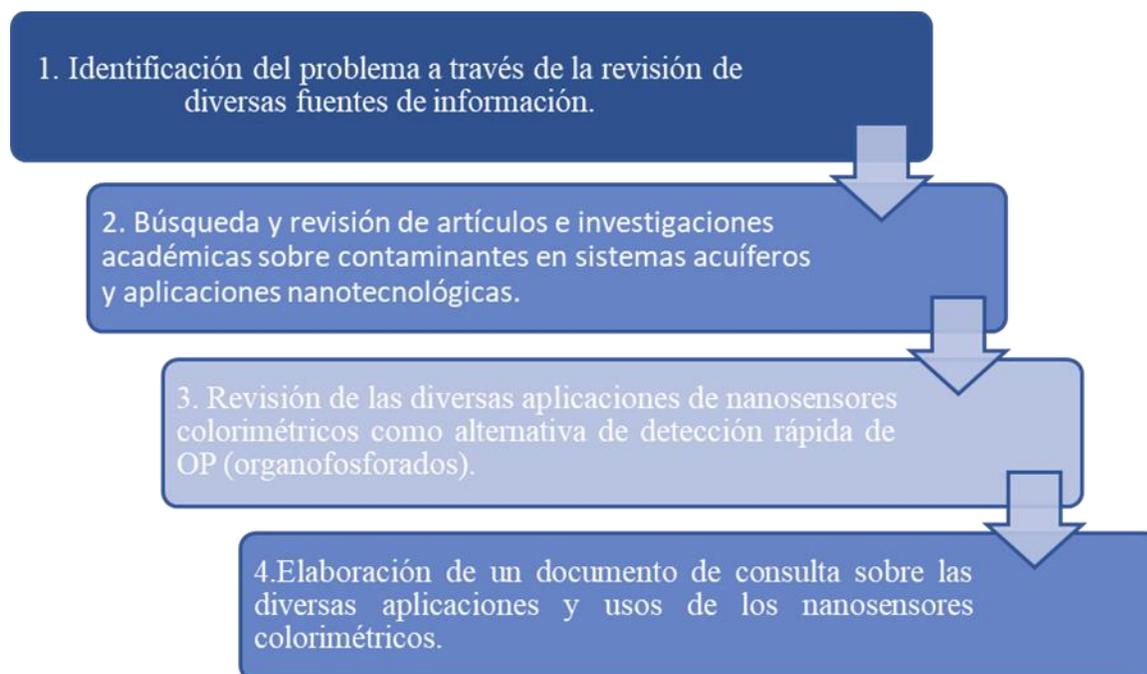
Examinar el uso de la nanotecnología en el desarrollo de nanosensores colorimétricos y su finalidad funcional como mejora de los sistemas existentes.

## Metodología

Esta revisión monográfica considera las fases que se observan en la Figura 1, a continuación, se presenta una descripción de cada una de ellas.

### Figura 1.

*Diagrama metodológico la revisión monográfica sobre Nanosensores Colorimétricos para la detección rápida de pesticidas organofosforados en sistemas acuosos*



Nota: fuente propia.

### **Fase 1. Identificación del Problema a través de la Revisión de Diversas Fuentes de Información.**

En la revisión y búsqueda de artículos y publicaciones en bases de datos como: Science Direct, Springer, Elsevier, Nature, Publishing, Pubmed, ACS Publications, researchgate, chempubsoc europe, Scielo, SAGE JOURNALS, Google académico y Dialnet, usando una ecuación de búsqueda en la que se incluyeron palabras claves como: sistemas acuíferos, contaminantes, pesticidas, organofosforados, contaminantes agrícolas, entre otras. La revisión bibliográfica

permitió identificar la incidencia de diferentes factores de la producción agrícola en la contaminación de los sistemas acuíferos y en la salud humana, así como la importancia de la nanotecnología para la detección de pesticidas y remediación en el medio ambiente por medio de nanosensores colorimétricos basados en nanopartículas metálicas, que constituyen una herramienta de fácil uso y acceso para la industria agrícola y alimentaria.

Se encontraron artículos de diferentes países entre ellos: China, Japón, Colombia, Canadá, , España, Brasil, Estados Unidos, Reino unido, India, México, Chile, Alemania, , Hungría, Irán, Grecia, Italia, Austria, Suiza, Malasia y Suecia.

## **Fase 2. Búsqueda y Revisión de Artículos e Investigaciones Académicas sobre Contaminantes en Sistemas Acuíferos y Aplicaciones Nanotecnológicas**

La revisión de la literatura se realizó en 11 bases de datos: Science Direct, Springer, Elsevier, Nature, Publishing, ACS Publications, researchgate, chempubsoc europe, Scielo, SAGE JOURNALS y Dialnet, identificando las palabras claves como:

nanotecnología, nanosensores, nanopartículas, organofosforados, acuíferos, nanomateriales, contaminación por organofosforados, pesticidas, nanosensores colorimétricos, estructuras químicas de organofosforados, aplicaciones nanotecnológicas en agricultura, acetilcolina, ETA (Enfermedades Transmitidas por Alimentos), CEs (Contaminantes Emergentes)". Las publicaciones encontradas se enfocaron en aplicaciones nanotecnológicas para la detección de pesticidas y contaminantes en la industria agrícola realizadas entre los años 2008 y 2021.

De los artículos encontrados se evidenciaron publicaciones en idiomas como el inglés, portugués y español y de 20 países diferentes como: México, Chile, Alemania, China, Colombia,

Brasil, Irán, Grecia, Italia, Austria, Japón, Estados Unidos, Reino Unido, India, Canadá, Hungría, Suiza, España, Malasia y Suecia.

### **Fase 3. Revisión de las Diversas Aplicaciones de Nanosensores Colorimétricos como Alternativa de Detección Rápida de OP (Organofosforados).**

El análisis de cada artículo se clasificó en revisiones, aplicaciones nanotecnológicas e investigaciones sobre varios tipos de nanosensores, definiendo los materiales, usos y caracterizaciones más importantes de nanopartículas metálicas para la elaboración de nanosensores colorimétricos para la detección de pesticidas OP.

### **Fase 4. Elaboración de un Documento de Consulta sobre las Diversas Aplicaciones y Usos de los Nanosensores Colorimétricos.**

El documento que sintetiza esta revisión monográfica se elaboró en el programa Word, el cual contiene una revisión de los artículos más relevantes sobre Nanosensores y sus diversas aplicaciones para la detección de pesticidas organofosforados (OP) en sistemas acuíferos, que relaciona las diferentes investigaciones y aplicaciones nanotecnológicas, para la elaboración de (NP) Nanopartículas como base fundamental para el éxito de dicha detección.

## **Contaminantes en Sistemas Acuíferos**

### **Un Punto de Partida en la Industria Agrícola**

Las distintas prácticas humanas, la urbanización y cambios en los hábitos alimenticios llevaron a los productores y empresas del sector agrícola al desarrollo de procedimientos innovadores en la producción, haciéndolos más competitivos y versátiles. Sin embargo, algunas de estas prácticas generaron problemas de salud pública debido a la manipulación, el almacenamiento, la higiene inadecuada, presencia de contaminantes como bacterias nocivas, productos químicos, toxinas naturales, o metales pesados que ocasionaron la aparición de enfermedades de transmisión alimentaria (ETA), incluyendo enfermedades gastrointestinales, neurológicas, inmunológicas, fallo multiorgánico, varios tipos de cáncer, e incluso la muerte (Kannan & Guo, 2020), así mismo la incorporación de sustancias químicas en el momento de la siembra o producción, han generado alertas debido a intoxicaciones y consecuencias resultantes de la contaminación ambiental (Instituto Nacional de Salud, 2020).

Los plaguicidas utilizados ampliamente para mejorar la producción, su eficiencia, rapidez y aumentar volumen de producción de alimentos han sido una de las fuentes de contaminación química generada en el control de plagas, ocasionando efectos crónicos en la salud, alteraciones neurológicas y reproductivas. Igualmente, con respecto a la potabilización del agua para consumo, que ha sido objeto de estudio de varias instituciones, convirtiéndose en un problema de salud pública por los vertimientos en diversos cuerpos de agua que pueden introducir contaminantes a los sistemas acuíferos, aunque representan peligro en casos de exposición prolongada, también pueden representar amenazas para la salud al exponerse varias ocasiones en periodos cortos de tiempo (Silva et al., 2015).

En general, algunos de los químicos utilizados por la industria agrícola están compuestos por organofosforados, su característica principal es inhibir enzimas con actividad esterásica (hidrólisis de ésteres solubles), inhibidores de la enzima colinesterasa en las terminaciones nerviosas, que genera una acumulación de acetilcolina, alterando el funcionamiento del impulso nervioso. Estos compuestos son liposolubles (solubles en grasas y aceites), biodegradables, se hidrolizan fácilmente en medio húmedo y pH alcalino, lo que facilita su absorción y dependiendo del grado de toxicidad y la vía de entrada, pueden presentar distintos efectos en el organismo. La intoxicación por organofosforados (OP) genera síntomas característicos “cambios en el estado de conciencia, debilidad muscular y excesiva actividad secretora” (Fernandez et al., 2010).

La contaminación por OP ha desencadenado una serie de riesgos a la salud humana, afectando principalmente la producción de la enzima colinesterasa, importante en la actividad de descomposición del neurotransmisor acetilcolina que interrumpe la interacción neurotransmisor-receptor. Esta función se altera debido a la presencia de sustancias anticolinesterásicas que interrumpen el proceso de hidrólisis del neurotransmisor, generando acumulación de acetilcolina en el espacio sináptico (espacio que separa a una neurona de otra) y aumentando así la duración de los impulsos nerviosos, ocasionando sobreestimulación ya que no pueden regresar a su estado de reposo. (Caro-Gamboa et al., 2020). Los OP debido a sus características químicas de liposolubilidad y volatilidad superan las barreras biológicas humanas. Las personas pueden estar expuestas desde muchos contextos (ocupacionales, accidentales, voluntarios o domésticos), de forma indirecta cuando se exponen a lugares donde se frecuenta el uso de pesticidas. (Caro-Gamboa et al., 2020).

El uso de agroquímicos constituye igualmente un riesgo para el medio ambiente, ya que tienen contacto directo con las superficies de tierra y cuerpos de agua, debido a las continuas

aplicaciones en los campos agrícolas, que además de ser cancerígenos, tóxicos y mutagénicos, presentan propiedades como resistencia al medio ambiente. Estas aplicaciones, desde el punto de vista de Salud ocupacional son una problemática que ha tratado de mitigarse con medidas de control implementadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) con programas de vigilancia. Estos controles utilizan la actividad de las enzimas colinesterasas como indicadores biológicos que detectan las exposiciones que pueden representar peligros para los trabajadores. Sin embargo, es preocupante como la globalización y en particular la producción agrícola, sigue constituyéndose en un factor determinante en la contaminación ambiental y riesgo para la salud; en estudio de Saini y otros (2017) se indica que los tipos de productos agroquímicos usados por los productores agrícolas, incluyen pesticidas para la producción y mejora en la protección de los cultivos, datos relacionados muestran que para este estudio en la India, el 55% utiliza insecticidas, 25% fungicidas y el 20% herbicidas. La mayoría de los agroquímicos son utilizados en la prevención y mitigación de plagas, generando bioacumulación de residuos en plantas, estos compuestos químicos se infiltran en los sistemas de aguas subterráneas (acuíferos) que son esenciales para el suministro de agua en muchas regiones y otros cuerpos de agua, que aunque se utilizan de acuerdo con la ley y con prácticas agrícolas aceptadas, siguen evidenciando efectos tóxicos en la salud (Saini et al., 2017a).

El uso de agroquímicos ha generado además de un problema de salud pública, una disyuntiva social, puesto que es necesaria su aplicación en los sectores agrícolas, pero los riesgos para la salud emergen en sus distintos usos; es de interés mantener un equilibrio entre estos dos factores.

## Contaminantes en Sistemas Acuáticos

El agua es un recurso no renovable y tiene una distribución del 97,5% en océanos y 2.5% como agua fresca para el consumo. Según Shiklomanov y Rodda (2003), este 2.5% está distribuido en glaciares (68.7%), subsuelo (30.1%), superficie y atmósfera (0.4%). Debido a las actividades económicas y domésticas, la demanda de su uso es incalculable, la agricultura es responsable por el 71%, el sector industrial del 19% y el doméstico del 11% (Steffens et al., 2017). Todo ello ha conducido a la contaminación de este recurso con nutrientes, metales pesados, bacterias, pesticidas, hidrocarburos, metabolitos provenientes de ingredientes farmacéuticos, o los conocidos como contaminantes emergentes, aquellos compuestos que son vertidos y generan un problema sanitario y ambiental, siendo estos poco conocidos y no regulados. (Steffens et al., 2017).

El agua contribuye al desarrollo sostenible, las poblaciones que cuentan con este recurso se ven beneficiadas en la reducción de la pobreza, el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, el bienestar social y el crecimiento inclusivo, la demanda de agua aumenta en todos los sectores, en particular para las industrias de energía, manufacturera y la agricultura en países en desarrollo. A pesar de esto, aunque el agua es esencial para el desarrollo y el crecimiento económico de las poblaciones, día a día se incrementan los desafíos en cuanto a seguridad hídrica para los seres humanos y la naturaleza (WWAP, 2015). Estudios sobre contaminantes en el agua han clasificado a un grupo particular de sustancias como “contaminantes emergentes” CEs, del inglés *Emerging Contaminants*, descritos como “materiales, elementos, compuestos, especies químicas, fenómenos químicos, reconocidos y no reconocidos, cuya presencia en el medio ambiente, en alimentos o agua, en cualquier producto natural o artificial, o en cualquier

ser vivo. Su control no está regulado por las administraciones Públicas y la disponibilidad de técnicas y métodos para su análisis es nula o muy limitada” (Cuenca Rompinelli, 2019).

Estos contaminantes emergentes se pueden clasificar en fuentes de contaminación puntuales y difusas, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Clasificación Ces*

<i>CEs</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ejemplos</i>
<i>FUENTES PUNTUALES</i>	Ingresan al medio ambiente a través de los cursos de agua	Efluentes industriales y domésticos, derrames accidentales, minería, inundaciones
<i>FUENTES DIFUSAS</i>	No presentan puntos de entrada específicos, pueden ser vías que resulten en una deposición parcial de contaminantes antes de llegar al curso de agua	La deposición atmosférica y flujos de agua superficial, particularmente de las prácticas agrícolas

---

Nota: Nanosensors for Detection of pesticides in Water, (Steffens et al., 2017).

Diversas investigaciones sobre contaminación se basan en estudiar aquellos compuestos que se encuentran en grandes cantidades en el medio ambiente y su representación en grados de toxicidad, sin embargo, gracias al avance de la tecnología se han logrado identificar otros contaminantes. Aunque los esfuerzos realizados actualmente han logrado optimizar la calidad del agua para consumo humano, siguen existiendo problemas relacionados con el incremento de utilización de productos químicos regulados, y otros no regulados, que continúan llegando a las aguas convirtiéndose en un riesgo para el medio ambiente y por ende para la salud humana

(Cuenca Rompinelli, 2019), estos contaminantes (CEs) se presentan en diferentes tipos como lo muestra la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Tipos de contaminantes*

Tipos de Contaminantes	Descripción
Contaminantes Orgánicos Persistentes	Conocidos como COPs, son éteres polidibromados, contaminantes tales como, orgánicos ácidos orgánicos, pesticidas, insecticidas, Dicloro-difenil-tricloroetano (DDT).
Contaminantes de procedencia Farmacéutica	Provenientes de productos farmacéuticos, medicamentos veterinarios, drogas de abuso como alucinógenos, agentes o medicamentos de diagnóstico de enfermedades (reactivos, antígenos, anticuerpos, etc), entre otros.
Contaminantes originados por fuentes de cuidado personal	Cremas, desodorantes, jabones, lociones, fragancias, cosméticos, suplementos nutricionales, etc.
Contaminantes originados por Nanomateriales	Nanopartículas de Plata, Nanotubos de carbono.

---

Nota: Contaminantes Emergentes: Origen y Destino, (Cuenca Rompinelli, 2019).

Es importante tener en cuenta que los contaminantes son considerados como persistentes si su vida media es mayor a los 2 meses para sistemas acuáticos, aunque no es una característica relevante para los CE's susceptibles a la biodegradación, estos se encuentran en el medio ambiente debido a las distintas actividades humanas de producción y al consumo masivo, algunos pueden degradarse en medios donde su carga de toxicidad se incrementa, inclusive pueden durar hasta décadas en algunos medios acuáticos y pueden transportarse a distancias largas (Cuenca Rompinelli, 2019).

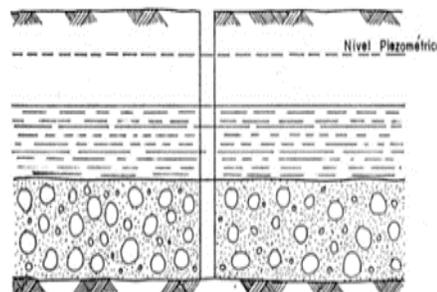
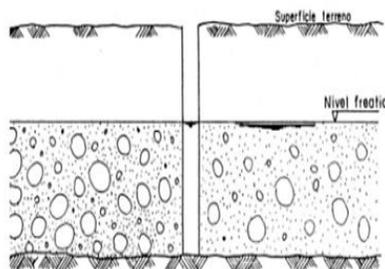
### **Sistemas Acuíferos y Contaminantes**

En el ciclo hidrológico de la tierra se hace posible la transmisión de agua desde los océanos a la superficie, de la superficie al subsuelo y a la atmósfera; las principales variables hidrológicas que permiten el desarrollo de este ciclo son precipitación, escorrentía, evaporación y transmisión, que se pueden ver afectadas por las distintas actividades humanas, entre ellas los desarrollos agrícolas que pueden alterar el ciclo natural del agua por medio de la contaminación del suelo, mediante el vertido de pesticidas a las cosechas, así como el vertido de residuos químicos a las fuentes de agua.(IDEAM, 2015). De lo anterior, radica la importancia de las Aguas Subterráneas que tienen origen en la lluvia, parte de esta se infiltra directamente a través del suelo, por grietas y poros, así mismo el subsuelo presenta formaciones geológicas como los acuíferos que permiten la circulación del agua por sus poros o grietas, logrando el aprovechamiento de estas para el consumo humano. (IDEAM, 2015). Los acuíferos más representativos se muestran en la Tabla 3.

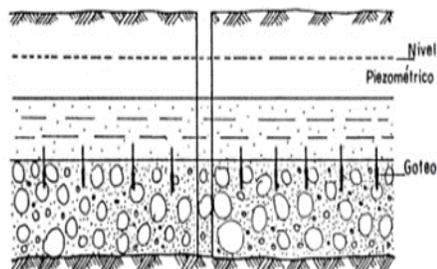
**Tabla 3.**

*Tipos de Acuíferos más representativos.*

TIPO	DESCRIPCIÓN
<p>ACUÍFEROS LIBRES</p>	<p>Son un esquema simple que corresponde a una zona impermeable que sirve de base a una zona permeable saturada de agua; más arriba, existe una franja permeable, sin saturar.</p> <p>En la perforación de pozos, el agua en ellos se sitúa al ras de la zona saturada, marcando el nivel freático, que en este caso es también el nivel piezométrico.</p> <p>Se asimilan a lagos o embalses subterráneos.</p>
<p>ACUÍFEROS CONFINADOS</p>	<p>El acuífero o la roca permeable queda encajada por encima y por debajo en terrenos impermeables; el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión de agua en los poros</p>



TIPO	DESCRIPCIÓN
<p>ACUÍFEROS SEMICONFINADOS</p>	<p>o fisuras es mayor que la atmosférica. En perforaciones cuando el acuífero se coloca en contacto con la atmósfera, el agua sube por la perforación, quedando el nivel del agua por encima del punto en que el pozo alcanzó al acuífero.</p> <p>Una de las rocas encajantes no es totalmente impermeable y permite la transmisión de agua a través de ella. Este presenta características intermedias entre el libre y el confinado.</p>



Nota: (IDEAM, 2015).

El agua subterránea es esencial para muchas regiones en el mundo. Su explotación se realiza a través de perforaciones que satisfacen la demanda de abastecimiento de muchas poblaciones, industrias, cultivos, entre otras; sin embargo, existen limitaciones para su aprovechamiento y hacen relación a las características particulares de las formaciones geológicas, la profundidad y la calidad del agua (Boujon, 2014), esta última depende de factores naturales, pero sobre todo las diversas actividades humanas que se relacionan con el uso frecuente de pesticidas para el control de organismos, que producen daños en las cosechas, donde

las sustancias químicas que los componen controlan el ataque sobre cultivos, reducen las pérdidas económicas y contribuyen a la demanda de alimentos en el mundo, pero afectan el medio ambiente y por ende la salud humana. (Rojas-Rodríguez et al., 2012).

Los pesticidas aplicados en los cultivos se mueven hasta las aguas superficiales por medio de un proceso llamado escorrentía, y pueden también lixiviar desde el suelo hasta aguas subterráneas. Todas las actividades agrícolas que incluyen aplicación de pesticidas representan riesgos para la salud humana, debido al uso, disposición de aguas y alimentos contaminados generados en esta actividad. La persistencia de estos en el medio ambiente, aunque contribuya al control de organismos dañinos para los cultivos, también pueden estar disponibles en la solución del suelo, y en particular aquellos que son solubles y tienen el potencial de moverse a través del perfil del suelo alcanzando las aguas subterráneas. La presencia de los pesticidas y su concentración varía en el medio dependiendo de los procesos de dispersión, volatilización, lixiviación, degradación química y biológica, que una vez aplicados sufren procesos de degradación y transformación, que conducen a la generación de nuevos productos pueden ser más móviles, persistentes y peligrosos que los de partida. (Rojas-Rodríguez et al., 2012).

### **Pesticidas**

Los pesticidas o plaguicidas son productos químicos que se utilizan para el control de plagas en la industria agrícola. Estos representan un papel importante y son la clave para alcanzar y mantener la productividad y rentabilidad en este sector, son beneficiosos para la agricultura debido a los crecimientos en los rendimientos de las cosechas, aunque, representan peligros de toxicidad para otras formas de vida, debido a la persistencia en los sistemas donde se aplican, por tanto pueden constituirse como un riesgo para la salud humana, convirtiéndose en un problema en cuanto a toxicidad para otras especies, ejemplo de ello es la disminución de las poblaciones de

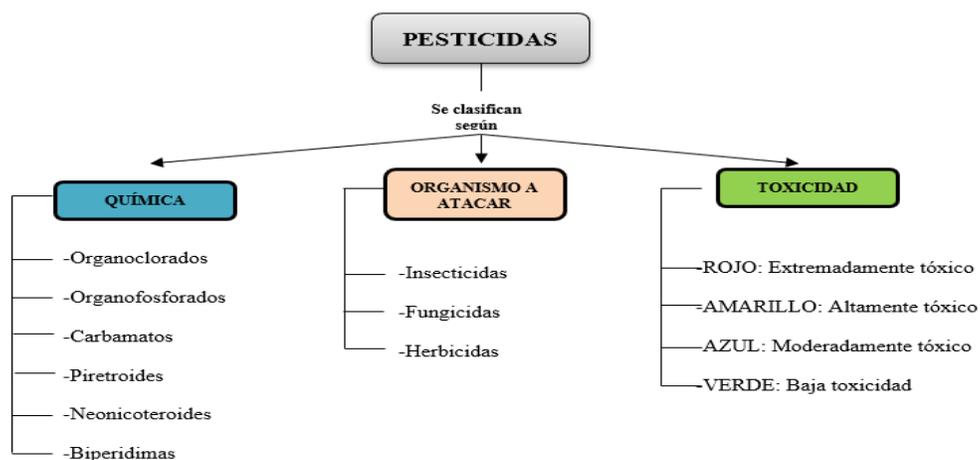
abejas, que repercute en la polinización de los cultivos, la contaminación de los alimentos y de las aguas superficiales y subterráneas. (Betancourt & Diaz, 2018).

### **Clasificación y Usos**

En su Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas la FAO y la OMS definen a los Plaguicidas o Pesticidas como cualquier sustancia o mezcla de sustancias de ingredientes químicos o biológicos destinados a repeler, destruir o controlar cualquier plaga, o regular el crecimiento de las plantas (OMS & FAO, 2019). Estos a su vez según (Betancourt & Diaz, 2018) y Steffens y otros (2017) (Steffens et al., 2017), se clasifican de acuerdo con su composición química en organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretroides, glifosato, neonicotinoides, entre otros. Así como también según el organismo al que atacan o controlan en: insecticidas (lucha contra insectos, larvas y hormigas); fungicidas (para combatir hongos), herbicidas (combatir malezas). También se pueden clasificar por su grado de toxicidad, como se presenta en la Figura 2.

### **Figura 2.**

#### *Clasificación de los pesticidas*

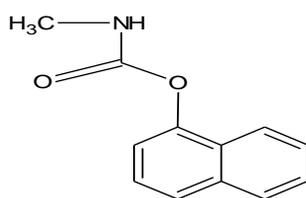


Nota: Adaptado de (Betancourt & Diaz, 2018)

La estructura de los pesticidas organoclorados corresponde a hidrocarburos clorados aromáticos, que pueden contener otros elementos como azufre y oxígeno; son sustancias químicas estables que se acumulan en los lípidos de organismos vivos y presentan alta residualidad en el suelo, de ahí su alto grado de toxicidad representativa en los alimentos (Betancourt & Diaz, 2018). En particular, los pesticidas organofosforados (OP) ver *ANEXO 1. Tabla , Estructura general de los OP, adaptado de (Alvarenga, 2013)*, se sintetizaron como una opción menos contaminante que los organoclorados (OC). Son altamente tóxicos para los vertebrados y menos persistentes en el medio ambiente de los OC, son usados para el control de plagas, insectos adultos y parásitos en plantas y animales. Ejemplo de ellos es el Glifosato (aminofosfonato, ligeramente tóxico y ligeramente persistente de 14 a 22 días en el medio), el Malatión y el Paratión. (Betancourt & Diaz, 2018). Los Carbamatos (Figura 3), son utilizados en la actualidad y representan un alto grado de contaminación en las aguas subterráneas y superficiales (Hao et al., 2015), se descomponen entre cuatro semanas a varios meses.

### Figura 3.

*Estructura de los Carbamatos*



Nota: Adaptado de (Betancourt & Diaz, 2018).

Los piretroides son compuestos sintéticos, como su nombre lo indica están basados estructuralmente en la molécula de piretrina natural, obtenida de las flores secas del Crisantemo. Estos alteran la apertura y cierre de los canales de sodio en las células nerviosas, dejándolos

abiertos y alterando las señales eléctricas de las células neuronales. Son utilizados en el control de plagas de insectos transmisores de enfermedades y son más amigables con el ambiente además de presentar baja toxicidad en mamíferos (Betancourt & Diaz, 2018). Los neonicotinoides son actualmente los plaguicidas más usados debido a su bajo riesgo de toxicidad, sin embargo, se les atribuye la disminución en la población de abejas y efectos en el sistema endocrino y reproductor de los animales. Estos plaguicidas afectan el comportamiento de las abejas, en la búsqueda de alimentación. (Benuszak et al., 2017).

Actualmente en la clasificación de la OMS se definen categorías de peligro de toxicidad aguda (Figura 4) en su documento “*Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA)*” (Organización Mundial de la Salud, 2019).

#### Figura 4.

*Clasificación OMS de pesticidas. DL (Dosis Letal)*

Clase	DL <sub>50</sub> para la rata (mg/kg de peso corporal)	
	Oral	Dérmica
Ia Sumamente peligroso	< 5	< 50
Ib Muy peligroso	5 - 50	50 - 200
II Moderadamente peligroso	50 - 2000	200 - 2000
III Poco peligroso	Más de 2000	Más de 2000
U Poco probable que presente un peligro agudo	5000 o más	

Nota: (Organización Mundial de la Salud, 2019).

En esta clasificación se dictan disposiciones teniendo en cuenta los efectos carcinógenos, mutágeno o reproductivo o efectos producidos por las exposiciones prolongadas o repetidas. En la (Figura 5) se relacionan algunos OP clase Ia (sumamente peligroso), que hace referencia a una de las categorías de peligro de toxicidad aguda, elaboración propia.

**Figura 5.***Algunos OP clase Ia-sumamente peligrosos*

Clase	Nombre común (inglés)	Nombre común (español)	Tipo químico	Estado físico	Uso principal	SGA	DL <sub>50</sub> mg/Kg	OBSERVACIONES
<b>(Ia) SUMAMENTE PELIGROSOS</b>	Chlorethoxyfos [ISO]	Clorotoxifós	OP	L	I	1	1,8	Sumamente peligroso por contacto cutáneo DL50= 12,5 mg/Kg
	Chlormepfos [ISO]	Clormefós	OP	L	I	1	D27	
	Disulfoton [ISO]	Disulfotón	OP	L	I	2	2,6	
	EPN	EPN	OP	S	I	2	14	El EPN causa neurotoxicidad retardada en gallinas
	Ethoprophos [ISO]	Etoprofos	OP	L	I-S	2	D26	Inhibición de la colinesterasa. Los efectos acumulativos son posibles
	Mevinphos [ISO]	Mevinfós	OP	L	I	1	D4	Mezcla de isómeros
	Parathion [ISO]	Paratión	OP	L	I	2	13	Elevada tasa de letalidad, regido por el convenio de Rotterdam
	Parathion-methyl [ISO]	Paratión-metilo	OP	L	I	2	14	Regido por el convenio de Rotterdam
	Phorate [ISO]	Forato	OP	L	I	1	2	Regido por el convenio de Rotterdam

Nota: Adaptado de Organización Mundial de la Salud, 2019.

Dentro de esta clasificación se puede destacar que el uso principal de estos es cómo (I) insecticidas e -IS insecticida aplicado al suelo, los productos sólidos presentan menor riesgo en cuanto a los líquidos, sin embargo, en general los OP en todas sus clases siguen representando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

### ***Pesticidas Organofosforados OP***

Teniendo en cuenta la clasificación anterior (Figura 5), existen una serie de ingredientes activos altamente peligrosos clase Ia según OMS, dentro de los cuales se realiza una relación específica con el tipo químico de los OP (Organización Mundial de la Salud, 2019). Los pesticidas OP son una categoría heterogénea de compuestos químicos, ampliamente utilizados en la agricultura; los más volátiles como sarín, somán, tabún, ciclosarina y VX, se utilizaron como agentes neurotóxicos en las guerras químicas a través de la historia, debido a su afectación al sistema nervioso (Alvarenga, 2013).

Aunque los OP fueron elaborados como una alternativa de sustitución de los OC, son altamente tóxicos debido a la inactivación de la AChE. Presentan intereses toxicológicos y comerciales, son esteres o tioles derivados de Ácido Fosfórico, fosfónico, fosfínico o fosforamídico. Su estructura química general es un centro de fosfato (*ver Anexo 1, Estructura general de los OP*), ligado a tres grupos R y un átomo de fósforo unido por doble enlace a un átomo de oxígeno o azufre. Usualmente R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> son grupos arilos o alquilos, que ligados a un átomo de fosforo que forman *fosfonatos*; cuando este enlace se da a través de un átomo de oxígeno o azufre forman *fosfatos* o *fosforotioatos*. También hay casos en los que R<sub>1</sub> está ligado directamente a un átomo de fósforo y R<sub>2</sub> a uno de oxígeno o azufre, formando *fosfonatos* o *fosfonotioatos*. Los insecticidas normalmente presentan grupos de ésteres R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> idénticos originando OP aquirales. El grupo L (llamado grupo de salida), puede estar ligado a un átomo de fosforo a través de un átomo de oxígeno o azufre, este átomo de fosforo es liberado cuando el OP es hidrolizado por enzimas fosfotriesterasas. (Alvarenga, 2013).

La mayoría de los compuestos OP, se riegan libremente en las tierras y sembrados agrícolas en todo el mundo, constituyéndose en un riesgo para el medio ambiente y la salud a través de la contaminación del agua potable y los alimentos de consumo humano, ya que las aplicaciones continuas permiten que drenen a las aguas subterráneas (Alvarenga, 2013). Ahora bien, para monitorear el residuo de pesticidas en matrices acuosas es necesario tener en cuenta las siguientes características: concentración de la muestra, límite de detección del equipo, sensibilidad del equipo y técnica utilizada, eficiencia de la técnica de extracción de la muestra desde la matriz de análisis, presencia de interferentes, entre otros aspectos; que como se observan hacen de este análisis un reto científico para el analista (Steffens et al., 2017).

## Nanotecnología

### Definición

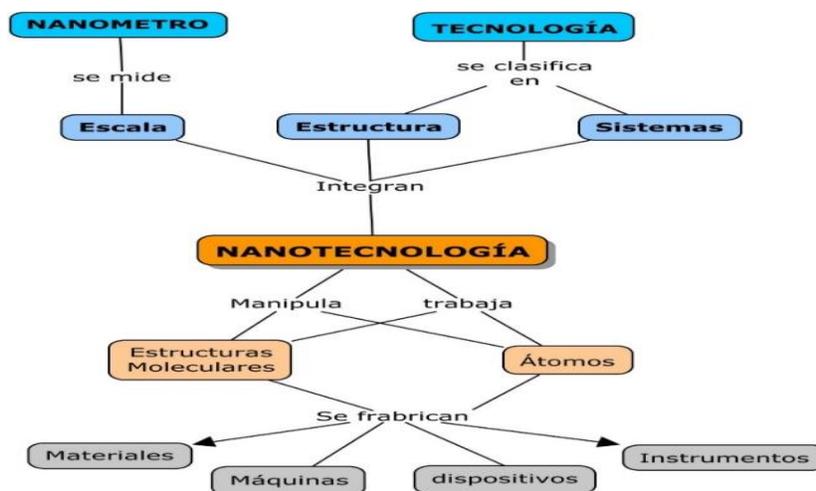
La nanotecnología es una ciencia que estudia las propiedades de la materia a escala nano, esta escala hace referencia a la millonésima parte de algo que se puede expresar como  $10^{-9}$  o 0.000000001, constituyéndose el nanómetro como una unidad de medida de longitud muy pequeña (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), 2017). El desarrollo de la nanotecnología en las últimas décadas ha trazado una ruta hacia el descubrimiento, desarrollo e innovación de nuevos materiales y aplicaciones mejoradas por la incursión de esta tecnología en diferentes áreas. Sin embargo, para llegar al desarrollo de este conocimiento científico, varios investigadores han contribuido a lo largo de la historia desde diferentes áreas de actuación como la física, química, biología, ingeniería y medicina. A partir de las teorías atomistas de Leucipo y Demócrito (año 450 AC), se abren nuevas fronteras en el conocimiento, y se desarrollan distintas investigaciones sobre la explicación atómica indivisible de la naturaleza que proporciona el modelo de Dalton (1800), la existencia de cargas positivas y negativas dentro del átomo en el modelo de Thomson (1897), la existencia de protones en el núcleo del modelo de Rutherford (1908), la existencia de los orbitales cuánticos en el modelo de Bohr (1913) y el actual modelo de Schödinguer y el descubrimiento de la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, que nos introduce en la comprensión de los fenómenos básicos y relacionados con la ciencia actual, (Pérez González & Pérez Acosta, 2016), sin embargo, el concepto de nanociencia nace con Richard Feynman, físico que en 1959 propuso fabricar productos con base al reordenamiento de átomos y moléculas. En su conferencia titulada “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” postuló la posibilidad de manipular la materia a escala molecular. Aunque el término de nanotecnología fue usado por primera vez por el científico Norio Taniguchi en 1974, investigador de la

universidad de Tokio, indicando que la nanotecnología consistía principalmente en el proceso de separación, consolidación y deformación de materiales átomo a átomo o molécula por molécula (Allevato, 2007).

A partir de estos conceptos, nacen diversas técnicas y metodologías que buscan resolver distintos problemas a nivel ambiental, agrícola, médico, farmacéutico, entre otros, para satisfagan de manera efectiva las necesidades humanas, de ahí el desarrollo y producción de nanopartículas y nanomateriales usados en la caracterización, síntesis y programación a escala nanométrica en el laboratorio.

### Figura 6.

#### Concepto de Nanotecnología



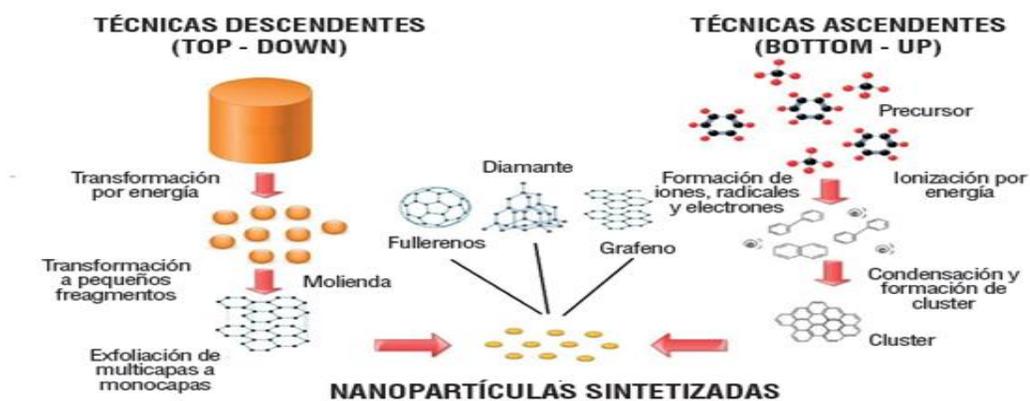
Nota: Adaptado de. (Cano, 2008).

El impacto de la nanotecnología se hace sentir en casi todos los sectores. Las Nanopartículas se utilizan actualmente para reforzar materiales y funcionalizar cosméticos; se emplean en nanoestructuras para conseguir superficies resistentes al rallado, hidrófugas, limpias o estériles. El injerto de moléculas orgánicas a través de nanoestructuración superficial ha permitido el avance en la fabricación de biosensores y dispositivos electrónicos moleculares.

Igualmente, es aplicable en el mejoramiento y rendimiento de los materiales en condiciones extremas, para aplicaciones en el sector espacial y aeronáutico (Cano Olivera, 2008). La fabricación exige un enfoque interdisciplinar en la investigación (Figura 6). Se consideran dos vías de trabajo conceptual (Figura 7): La primera hace relación a la miniaturización de microsistemas denominado «de arriba abajo» o «topdown» proceso de ensamblaje y la segunda denominada «de abajo arriba» o «bottom-up» proceso de síntesis, que hace relación a imitar la naturaleza mediante el desarrollo de estructuras a partir de los niveles atómico y molecular. La aplicación de los diferentes análisis nanotecnológicos sobre alimentos, agua y el medio ambiente, han generado instrumentos para detectar y neutralizar la presencia de microorganismos o plaguicidas presentes, mediante técnicas de nanoetiquetado para monitoreo de alimentos; el desarrollo de métodos de recuperación basados en técnicas foto-catalíticas, que permiten disminuir el efecto de la contaminación y otros daños ambientales como presencia de petróleo en el agua o suelo (Cano Olivera, 2008).

**Figura 7.**

*Técnicas de síntesis de nanomateriales*



Nota: Adaptado de (Gómez-Garzón, 2018)

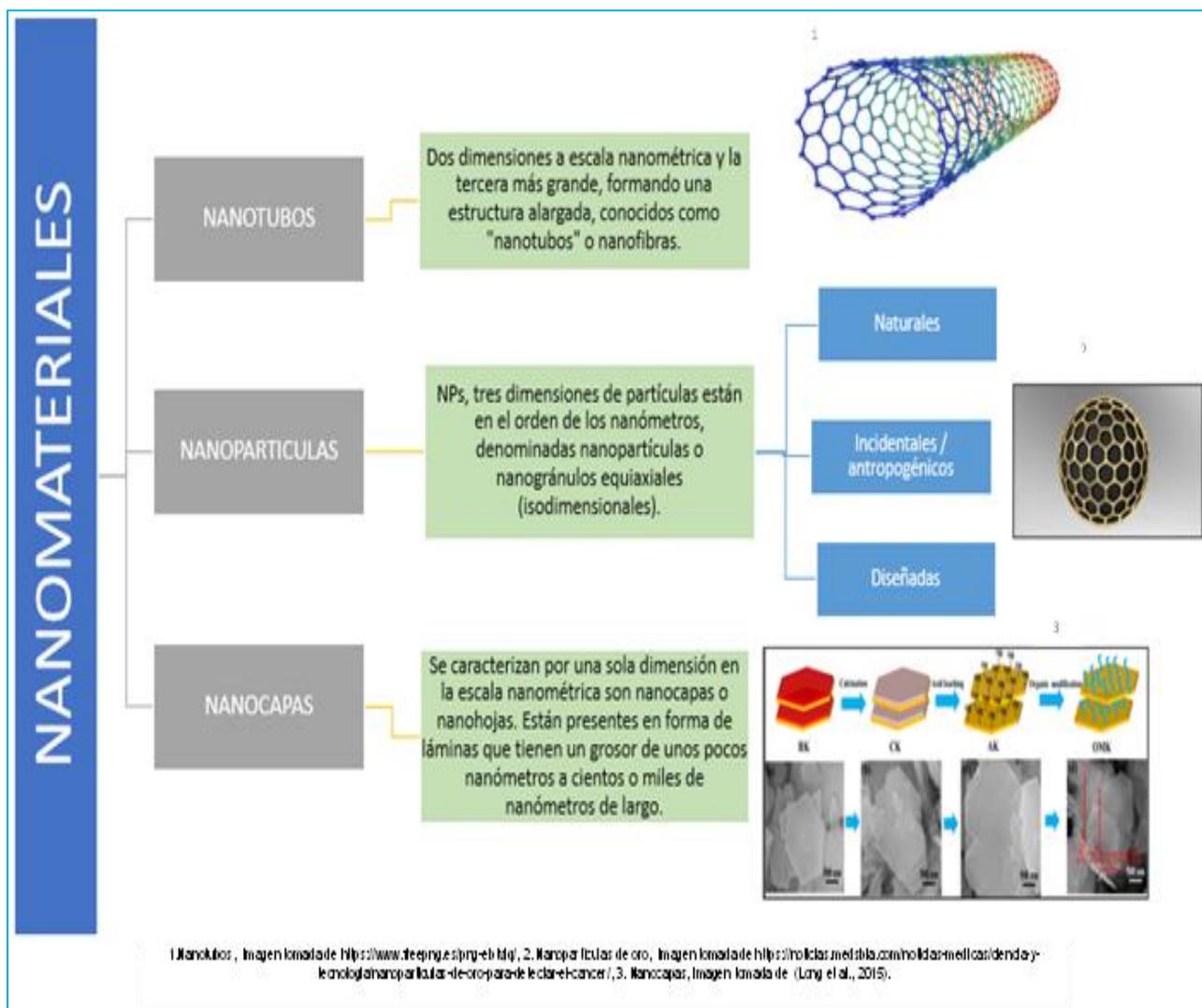
## Nanomateriales

La nanotecnología implica la comprensión y control de la materia a nivel atómico, aquí los materiales objeto de investigación, presentan propiedades y comportamientos únicos en comparación con el mismo en su microestructura (Saini et al., 2017a). Las primeras definiciones del término “nanomaterial” aparecen en la regulación para productos cosméticos en la Unión Europea en el año 2009, y en la regulación de productos manufacturados a nanoescala en los Estados Unidos, en donde los nanomateriales se venían utilizando sin control, ni regulación alguna. Este tipo de definiciones hacen referencia a materiales insolubles o biopersistentes e intencionalmente manufacturados, con una o más dimensiones externas o una estructura interna en el rango de escala entre 1 y 100 nm (Lizarazo-Salcedo et al., 2018). Los nanomateriales se clasifican en tres grandes categorías, según su función y dimensión, definidas en la Figura 8 (Saini et al., 2017a).

En el caso de las nanopartículas su procedencia puede ser “*Natural*” cuando son producto de procesos que ocurren en el medio ambiente (por ejemplo, polvo volcánico, polvo lunar, bacterias magnetotáticas, minerales, etc.), “*Incidental / antropogénica*” cuando son producto de procesos industriales, artificiales o procesos no controlados como: escape de motores diesel, combustión de carbón, humos de soldadura, etc., y “*Diseñada*” cuando son creadas intencionalmente con formas y propiedades específicas, como tamaño, forma, propiedades de superficie y químicas.

**Figura 8.**

*Clasificación esquemática de Nanomateriales*



Nota: Adaptado de (Saini et al., 2017)

### **Tipos de Nanopartículas y Usos**

Actualmente existen diseños experimentales dirigidos a la síntesis de nanopartículas (NPs) magnéticas de tamaño controlado (*Ver ANEXO 2, Tipos de Nanopartículas*), con el fin de suministrar nuevas propiedades a los nanomateriales. La forma, el tamaño y las propiedades condicionan el comportamiento de las nanopartículas, por esto es primordial el entendimiento de todos los aspectos fisicoquímicos (Lárez et al., 2015). Actualmente, la ingeniería o diseño de nanopartículas ha permitido fusionar diferentes áreas con el propósito de dar soluciones a la industria farmacéutica, cosmética y electrónica. De esta manera la relación entre sensores y nanotecnología ha logrado un nuevo campo para esta ciencia.

### **Nanosensores utilizados para la Detección de Contaminantes**

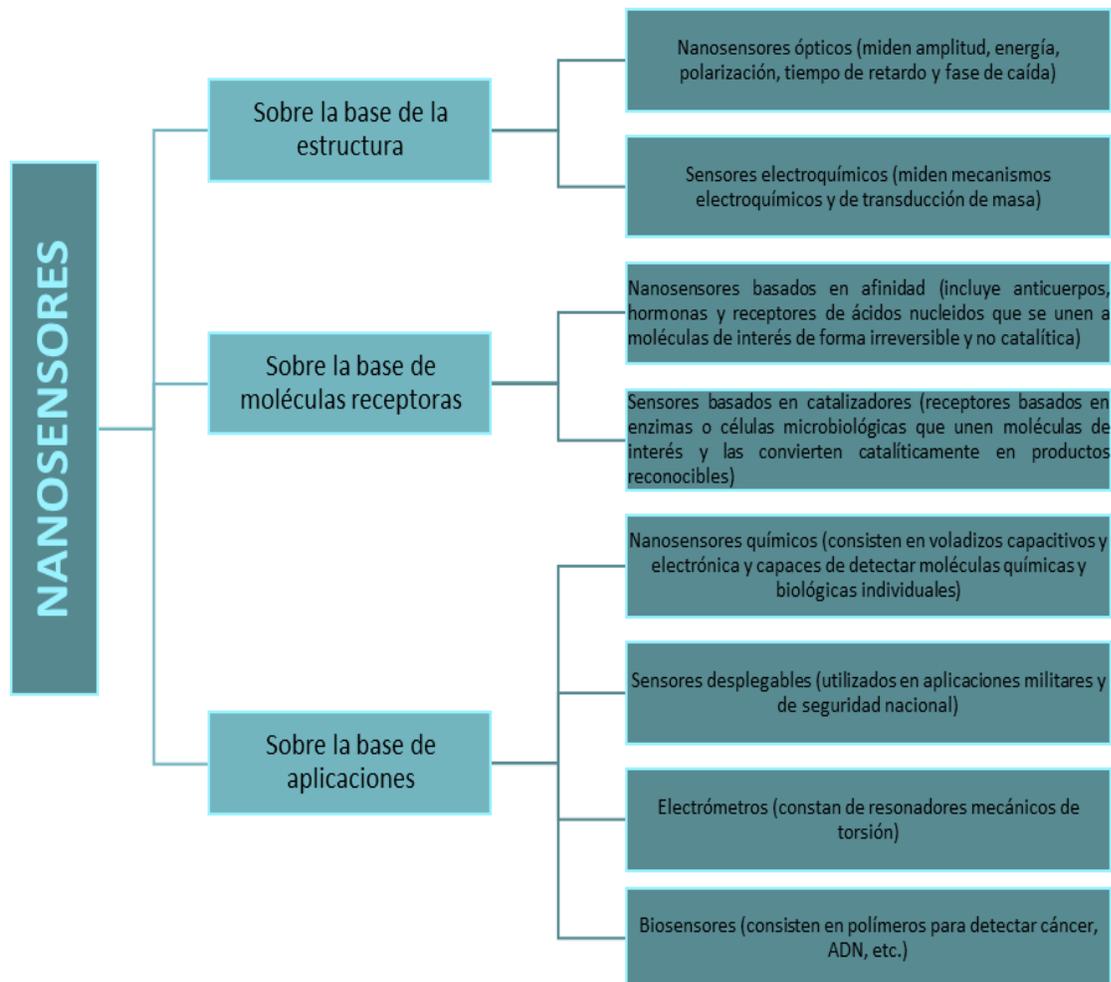
Un sensor llamado también un detector, es un dispositivo que mide una cantidad física y la convierte en una señal que puede ser leída por un observador o por un instrumento (Guel et al., 2013). Los nanosensores son sensores mecánicos o químicos a escala nano, entre 1 y 100 nm, que permiten identificar en tiempos cortos la presencia de sustancias patógenas o químicas adicionadas a los cultivos; actualmente la nanotecnología y sus avances, han sido objeto de estudio como medio para abordar la problemática de detección, degradación y eliminación de pesticidas, el uso de diversos nanomateriales como nanotubos, nanopartículas y nanocompuestos, han llevado al desarrollo de investigaciones y aplicaciones, debido al tamaño, la alta relación de superficie-volumen, las propiedades fisicoquímicas y la especificidad, que se constituyen en un medio de detección específica de pesticidas (Rawtani et al., 2018).

Desde el punto de vista informático, los nanosensores para detectar partículas contaminantes utilizando sistemas de información, consisten en uno o varios microchips que contienen nanofilamentos recubiertos de moléculas biológicas con respuesta a un compuesto en específico. Cuando uno de estos compuestos a estudiar se acerca a estos sensores ultrasensibles, sus moléculas se unen a estos nanofilamentos causando una señal eléctrica detectable, estas señales nos permiten determinar y distinguir los diferentes niveles de dicho compuesto (Cano, 2008). En consecuencia, un nanomaterial utilizado para sensibilidad es llamado nanosensor (Saini et al., 2017a).

Es importante reconocer que existen nanosensores naturales y sintéticos; los primeros no pueden ser construidos en el laboratorio, pero pueden ser manipulados para responder a estímulos específicos; en tanto los nanosensores que son fabricados de manera artificial tienen propiedades parecidas a los microsensors, estos dependen crucialmente de los materiales con

los cuales son fabricados, para que respondan a un estímulo específico. Algunos nanosensores para detección han sido elaborados con carbono que les brinda propiedades altas de dureza, resistencia, estabilidad química, entre otras. (Cano, 2008).

Gran variedad de nanosensores puede ser clasificados sobre la base de su estructura, moléculas receptoras y las aplicaciones conforme se muestra en la Figura 9. Los sensores ideales deben poseer características de especificidad para la especie destino, sensibilidad a los cambios en las concentraciones de las especies objeto de estudio, tiempos de respuestas eficientes y rápidos, vida útil extensa (por lo menos de varios meses) y tamaño pequeño con posibilidad de fabricación a bajos costos (Saini et al., 2017a).

**Figura 9.***Clasificación de los nanosensores*

Nota: Adaptado de (Saini et al., 2017)

Dentro de la industria de la nanotecnología se encuentran varios tipos de nanosensores basados en nanopartículas para la detección de sustancias de interés y bacterias transmitidas por los alimentos y otros medios; los nanomateriales utilizados en la detección se denominan nanosensores, construidos a escala nanométrica para recopilación y transferencia de datos que puedan ser analizados. A continuación, se hará una descripción de los tipos de nanosensores utilizados por la industria en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Tipos de sensores químicos (señal primaria que transforma) y especies que pueden analizar.*

Tipo de Sensor	Señal Primaria	Analito
Optico	*Absorvancia	
	*Reflectancia	*pH
	*Luminiscencia	*iones (metales pesados)
	*Fluorescencia	*Gases
	*Índice de Refacción	*Moléculas
	*Efecto Optotérmico	
	*Dispersión de la luz	
Electroquímico (Potenciométrico, Potenciométrico de electrolito sólido, Amperoétrico y Chemfet e Isfet)	*Potencial	*pH
	*Intensidad de Corriente	*iones (metales pesados)
	*Flujo de corriente de drenaje a fuente	*Gases *Moléculas
	*Conductividad	
Eléctrico	*Capacitancia	*iones
	*Permitividad eléctrica	
	*Masa	*Gases *Líquidos volátiles
Masico (piezoeléctrico y de Onda Acústica de superficie)	*Efecto Paramagnético	*Moléculas *Gases
	*Calor	*Moléculas *Iones
Termométrico	*Propiedades de las Radiaciones (Rayos X, $\beta$ y $\gamma$ )	*Moléculas

Nota: Adaptado de (Laila, 2010).

La necesidad de desarrollar nuevas técnicas de detección simplificadas y portátiles para identificación de OP ha sido satisfecha con el uso de nanosensores, donde los requisitos esenciales para que estos puedan ser viables hacen referencia a la capacidad de detección con respecto a la especificidad, sensibilidad, temperatura, pH, respuesta rápida, implementabilidad en el campo de estudio, análisis cualitativo y cuantitativo, rentabilidad y una fácil transducción de señales. En investigaciones recientes se han desarrollado ampliamente el uso de nanomateriales con propiedades físicas y químicas especiales para nanosensores en la detección de OP como las nanopartículas de óxido metálico, los puntos cuánticos (QD), el grafeno, los polímeros de coordinación, entre otros, que ofrecen actualmente soluciones rápidas, sensibles y sencillas (Kumar et al., 2015).

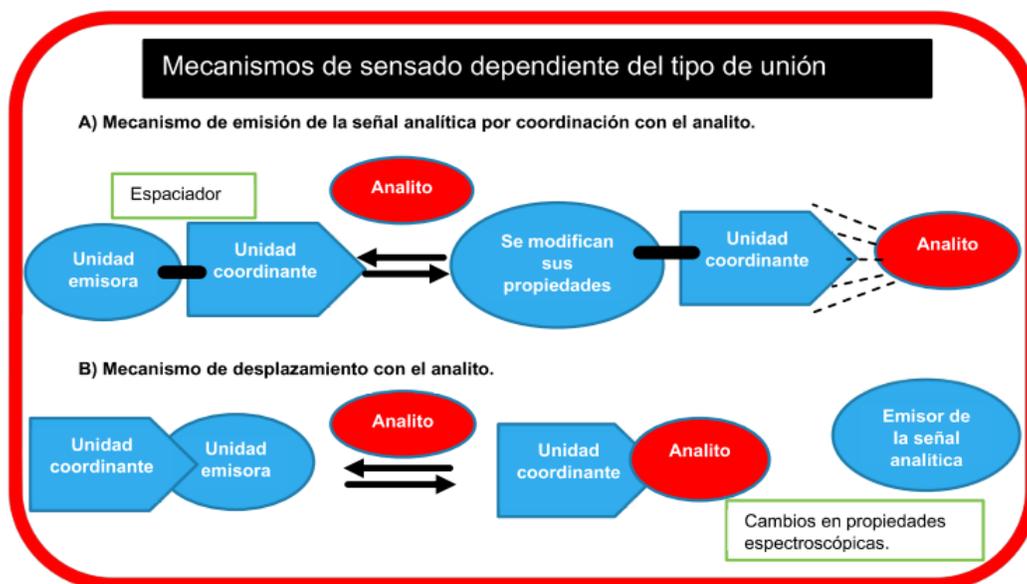
### **Nanosensores Químicos Fluorescentes**

Los sensores basados en fluorescencia ofrecen grandes ventajas sobre los métodos convencionales usualmente utilizados para la detección de OP, como su alta sensibilidad a una sola molécula y su respuesta casi instantánea. Igualmente, son capaces de medir concentraciones de analitos  $10^6$  veces menores que las técnicas comunes de absorbancia (Obare et al., 2010). Los sensores químicos fluorescentes naturales o sintéticos, son moléculas que presentan cambios en la emisión de fluorescencia, estos cambios se presentan en propiedades como pH, rigidez, presión, temperatura, potencial eléctrico, entre otros, absorben la energía en forma de radiaciones electromagnéticas de onda corta (GAMA, Rayos X, UV) y emiten parte de esa energía en forma de radiaciones electromagnéticas de longitud de onda más larga, algunas de estas sustancias que son capaces de emitir luz al ser excitadas por diferentes tipos de reacción, a estos se le denominan fluoróforos (Esteban Uriel, 2021). Es importante tener en cuenta que los sensores

químicos actúan mediante dos mecanismos, los que dependerán del tipo de unión entre las unidades, representados en la Figura 10. El primero hace referencia al mecanismo *unidad coordinante-unidad emisora* donde se encuentran unidas covalentemente las dos unidades, esto puede ser directamente o por medio de un espaciador, la unidad coordinante acciona recíprocamente con el analito con interacciones débiles (electrostáticas y enlaces de hidrógeno) lo que permite que la unidad emisora se modifique principalmente en la absorción provocando un cambio de color y fluorescencia. El segundo mecanismo es el de *desplazamiento*, en el que la interacción covalente entre las dos unidades (coordinante y emisora) está ausente y su interacción es débil, generando una fuerte interrelación entre el analito y la unidad coordinante que provoca la sustitución de la interacción con un fluoróforo, causando el desplazamiento de este y su liberación a la solución, generando modificaciones en sus propiedades espectroscópicas (Esteban Uriel, 2021).

### Figura 10.

*Mecanismo de sensado y estructura general de marcadores fluorescentes*



Nota: Adaptado de (Esteban Uriel, 2021).

Para el diseño de sensores fluorescentes se requiere tener una alta afinidad y especificidad por el analito con el que interactuaran, de tal forma que se tenga una respuesta reconocida por el sistema de detección fluorescente a usar, o si es el caso obtener una respuesta electromagnética visible en el espectro visual menores a 700 nm; esto nos lleva a tener limitantes como por ejemplo la fase líquida en la que se utilizan las muestras y atributos fisicoquímicos como el pH, que anulan el efecto fluorescente (Laila, 2010).

### **Sensores químicos colorimétricos**

Los sensores colorimétricos o sensores basados en absorción de luz visible consisten en el cambio de las propiedades ópticas del sistema dentro del rango visible del espectro. La señal transmitida por el sensor utilizado, es consecuencia de la interacción con la muestra, evidenciándose en un cambio de color que puede ser detectado a simple vista; este cambio es tanto en su intensidad con respecto al tono original, así como en los cambios presentados en el transcurrir de un color a otro (Pablo Tancredi, 2011).

Para facilitar el uso y diseño de los nanosensores colorimétricos, teniendo en cuenta que estos no presentan análisis de tipo cuantitativo, a menos que estén acompañados de sistemas informáticos que permitan análisis específicos, es primordial clarificar que los sensores colorimétricos reconocen dos estados dentro de una matriz: presencia o ausencia, concentración por debajo de  $X$  o por encima de  $X$ , donde  $X$  es el valor umbral de concentración del analito que activa el sensor y permite visualizar el cambio de color. Teniendo en cuenta lo anterior, los sensores colorimétricos son ideales para ensayos positivo/negativo (Pablo Tancredi, 2011).

Los avances nanotecnológicos constan de nanosensores colorimétricos basados en nanopartículas de oro (AuNPs-Cys), por medio de métodos colorimétricos que se utiliza para la detección rápida y la estimación de campo del nivel y distribución de pesticidas en los tejidos de

las plantas en la granja in situ (Tu et al., 2019). Actualmente han surgido ensayos colorimétricos basados en nanopartículas metálicas principalmente de Au y Ag, para la detección de iones tóxicos como una opción simple y de bajo costo, estos ensayos están basados en la agregación controlada de nanopartículas metálicas modificadas, que en presencia de iones analitos, producen un cambio de color en la solución de nanopartículas, por lo que se puede lograr una detección rápida de iones metálicos sin necesidad de equipos, debido a que la observación de estos cambios se ve a simple vista. Igualmente, se han desarrollado sondas colorimétricas para la detección de iones metálicos específicos (Sener et al., 2014).

### **Sensores electroquímicos**

Los sensores electroquímicos son dispositivos químicos que reaccionan a cambios en el potencial o la corriente eléctrica, como consecuencia de la presencia de un agente o especie química que interactúa con él. Cuando el elemento sensor está constituido por un elemento químico orgánico o inorgánico, se dice que este es un sensor químico; este elemento químico se selecciona para que interactúe con la especie a analizar (analito), siendo esta elección muy específica, a este tipo de sensores se les conoce como ISE por sus siglas en inglés, *Ion Selective Electrodes*. Como en todos los tipos de sensores, se requiere de un elemento interno sensible a la interacción y que transporte una señal a un dispositivo de medida que permita el procesamiento de la información; a este elemento se le conoce como *transductor*, el analito al cual se dirige la acción selectiva del elemento sensor se le conoce como *analito diana* (Ortega, n.d.).

Teniendo en cuenta, las técnicas electroquímicas utilizadas, estos sensores se pueden dividir en conductímetros (monitoreo de la conductividad o resistencia), potenciométricos (monitoreo de voltaje) y amperométricos (monitoreo de corriente) (Julia Bujes Garrido, 2013).

Para lograr el aumento en la sensibilidad de los sensores se utilizan elementos bioquímicos o biológicos como enzimas, tejidos, microorganismos, anticuerpos, entre otros. Los parámetros principales que deben considerarse para el desarrollo de sensores electroquímicos, especialmente aquellos para la detección de pesticidas, son la reproducibilidad, selectividad, sensibilidad, estabilidad a largo plazo, portabilidad, facilidad de uso y rentabilidad (Aragay et al., 2012). En el desarrollo y uso de nanomateriales para detección electroquímica de pesticidas, se resalta la utilización del oro coloidal, empleado en un sistema basado en una membrana compuesta de quitosano y AuNP, para la detección de niveles bajos de picloram en muestras de agua de arroz, lechuga y arrozales, con un límite de detección de 21 nM de picloram usando voltamperometría cíclica. (Tang et al., 2008). Para la detección de residuos de pesticidas OP, se han desarrollado estrategias de biodetección basadas en nanomateriales. En aplicaciones de seguridad alimentaria se han desarrollado nanosensores basados en  $\text{MnO}_2 / \text{Mn}_3\text{O}_4$  y  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene} / \text{AuNPs}$  fabricados (estructuras orgánicas de metal). Derivadas de esqueletos metalorgánicos (MOF) para la detección ultrasensible de OP. En particular, los microcuboides jerárquicos 3D  $\text{MnO}_2 / \text{Mn}_3\text{O}_4$  derivados de Mn-MOF formados por alineados, altamente ordenados (Kannan & Guo, 2020).

## Técnicas de Caracterización, Materiales y Métodos de Síntesis de Nanosensores Colorimétricos para Detección de Pesticidas OP

### Química Heterogénea y Química Homogénea

Los plaguicidas son los materiales destinados a eliminar y controlar plagas y malezas. Son utilizados en agricultura para proteger los cultivos de diversas enfermedades y daños por plagas. Los plaguicidas pueden clasificarse sobre la base de: (a) origen; y (b) tipo de plaga. Entre los diferentes tipos de pesticidas, los pesticidas químicos encuentran grandes aplicaciones en los campos agrícolas. Sin embargo, más del 90% de los plaguicidas rociados llegan a destinos distintos de sus objetivos porque se rocían sobre el campo agrícola. Estos químicos persisten en el suelo y llegan a los cuerpos de agua a través de escurrimientos agrícolas. La calidad del agua disminuye significativamente debido a la presencia de estos pesticidas, además su uso excesivo lleva consigo diversos problemas para los seres humanos y el medio ambiente. Algunos de los pesticidas más nocivos amenazan la biodiversidad, propenden en la reducción de poblaciones de insectos polinizadores, y también la destrucción del hábitat de las aves. Actualmente, se han desarrollado diferentes tipos de nanomateriales que pueden surgir como una opción de determinación, identificación y biorremediación del medio ambiente, que permiten la detección y degradación de estos pesticidas (Rawtani et al., 2018).

La detección y degradación de pesticidas basados en nanomateriales se puede comprender desde la *Química heterogénea*, donde las nanopartículas utilizadas se inmovilizan en diferentes materiales de soporte antes de ser usados para la detección de pesticidas o remediación. Estos materiales de soporte con nanopartículas inmovilizadas se añaden en las muestras de agua que contienen pesticidas. Las nanopartículas inmovilizadas luego detectan y

degradan el pesticida en el agua. La reutilización de dichos sistemas de soporte para diferentes muestras de agua son una gran ventaja del proceso. Además, la prevención de la aglomeración de nanopartículas tras su inmovilización sobre soportes sólidos también es un mérito de este enfoque. Sin embargo, un cambio importante en el comportamiento y las propiedades de tales nanopartículas se notan después de la inmovilización (Rawtani et al., 2018) y desde la *Química Homogénea*, las nanopartículas se dispersan inicialmente en la muestra de agua que contiene el pesticida. Las nanopartículas dispersas luego degradan o detectan los pesticidas presentes en el agua. La mayor ventaja del proceso es la utilización de toda la superficie, que es presentada por las nanopartículas. Sin embargo, estas nanopartículas no se pueden eliminar fácilmente del agua, una vez que se dispersan en el sistema acuático. Las nanopartículas dispersas pueden contaminar el agua purificada, lo que podría ser un inconveniente (Rawtani et al., 2018). De allí la importancia para analizar los diferentes métodos de síntesis, materiales y estrategias que permitan el uso de nanomateriales en la detección de pesticidas en muestras acuosas, donde se permita, el reúso, la eliminación de la matriz de análisis y que sus materiales no presenten interferentes.

### **Síntesis de NPs para la Elaboración de Nanosensores**

La síntesis y caracterización de nanopartículas constituye una importante área de investigación en la actualidad, para lo cual se han investigado y desarrollado diversos métodos que simulan las condiciones ambientales, logrando sintetizar en los laboratorios nanopartículas de acuerdo con la aplicación que se darán a las mismas. La eficiencia de estos métodos se ve reflejada en la pureza y cristalinidad que presentan las nanopartículas las cuales se determina a través de procesos de caracterización como son análisis de difracción de rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy, Microscopía Electrónica

de transmisión (TEM), por sus siglas en inglés transmisión electron Microscopy, absorción atómica, determinación de la porosidad, entre otras (Borja Borja & Rojas Oviedo, 2020).

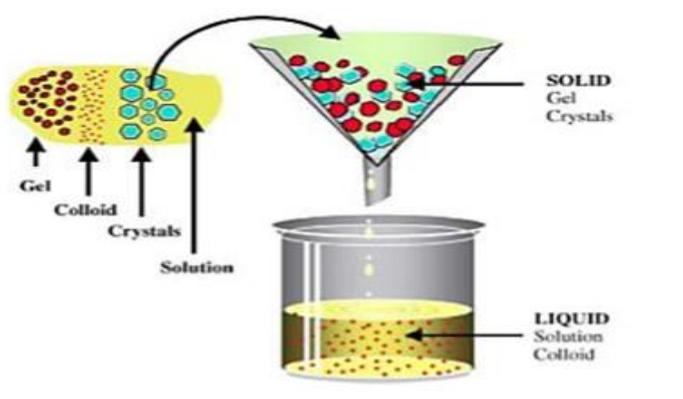
Los nanomateriales se pueden obtener de origen natural, incidental cuando surgen en procesos industriales; y el más común de origen artificial, producido por dos procesos de fabricación: las técnicas descendentes (top-down) que consisten en la división de material macroscópico hasta llegar al tamaño nanométrico, se aplican una variedad de métodos físicos como la molienda o el desgaste, métodos químicos y la volatilización de un sólido seguido por la condensación hasta la obtención de ensambles que son controlados con precisión hasta alcanzar el tamaño deseado; por otro lado, las técnicas ascendentes (bottom-up) consisten en la fabricación de NPs con capacidad de autoensamblarse o autoorganizarse a través de la condensación de átomos, se sintetizan moléculas que espontáneamente se autoensamblan sobre el cambio controlado de un disparador químico o físico como un cambio en el pH. Los mecanismos físicos que producen el autoensamblaje, se deben a la termodinámica e interacciones moleculares competitivas que incluyen hidrofóbicas/hidrofílicas, enlaces de hidrógeno e interacciones de van der Waals (Gómez-Garzón, 2018).

El *Método Sol-gel* es un proceso químico en fase húmeda utilizado para la fabricación de nanomateriales, comúnmente un óxido metálico. Para la preparación de zeolitas se utiliza este método Figura 11, en soluciones acuosas, herméticamente aseguradas, acompañado de un tratamiento hidrotérmico desde la temperatura ambiente hasta 300°C. El procedimiento inicia con la homogenización de los reactivos, solventes o aditivos, que se da a temperatura ambiente y con un agitador magnético se evita la aglomeración. Existen técnicas que utilizan siembra de cristales para la aceleración del proceso de nucleación y rendimiento, trasvasando la mezcla en una autoclave de teflón sellada herméticamente dentro de una camisa de acero para evitar fuga

de gases, la autoclave necesita la aplicación de un proceso hidrotérmico controlado por un periodo de tiempo que lo determina el material que se requiere sintetizar, posteriormente se continúa con la etapa de nucleación, crecimiento de cristales y la precipitación, el precipitado es separado de la fase líquida a través de filtración al vacío o centrífuga, el sólido obtenido es lavado con agua destilada, secado calcinado y caracterizado (Borja Borja & Rojas Oviedo, 2020).

### Figura 11.

#### *Proceso sol-gel*



Nota: adaptado de (Borja Borja & Rojas Oviedo, 2020)

El *Método sólido*, se lleva a cabo en fase sólida. Se utiliza en áreas dedicadas al estudio de reacciones de síntesis en paralelo, porque permite controlar las reacciones en tiempo real. La efectividad de este método refiere las siguientes consideraciones: 1. Las reacciones se deben llevar a cabo en un contenedor herméticamente sellado. 2. La reacción comienza con la formación de las primeras subunidades y partículas que van a dar lugar a reacciones secuenciales, a esto se lo conoce como proceso de iniciación. 3. En el transcurso de la reacción se genera la formación de grupos protectores que se eliminan para provocar la formación de un medio de síntesis con subunidades ligadas que a su vez presentan partículas con grupos funcionales libres, que se mezclarán con un exceso de subunidades idénticas que contendrán, un

grupo funcional capaz de reaccionar con los grupos reactivos libres de las subunidades ligadas a partículas; un segundo grupo funcional reactivo que reaccionará durante la síntesis. 4. Los grupos reactivos libres y funcionales mezclados reaccionan para formar enlaces covalentes formando productos de reacción ligados a partículas. 5. Las subunidades que no reaccionan se separan para repetir nuevamente todo el proceso. (Borja Borja & Rojas Oviedo, 2020)

El *método hidrotérmico* es la síntesis por reacciones químicas en medios cerrados a temperaturas controladas y presión ambiental. Se utilizan para mejorar la regularidad y uniformidad de la meso estructuras de los nanomateriales, esto es aplicable a la exploración de nuevos materiales, que permiten el control de su morfología, tamaño y valencia. Estos métodos por lo general se realizan en paralelo con métodos sol-gel, una vez preparado la solución, la aplicación de temperatura ayudará en la reorganización, crecimiento y cristalización de las nanopartículas. La temperatura normal utilizada para estos métodos va de los 80 hasta los 130 °C, aunque dependiendo de los materiales a utilizar y lo esperado, estas temperaturas pueden alcanzar hasta 300 °C. (Borja Borja & Rojas Oviedo, 2020).

Para el sistema de síntesis de Puntos Cuánticos (QD o PCs), el procedimiento más común es la síntesis coloidal o síntesis orgánica. Se usan soluciones madre de sales de Selenio, Teluro, Sulfuro u otros y mediante pirólisis en un solvente de coordinación a alta temperatura como el TOP (trioctilfosfato) o TOPO (Oxido de tri-n-octilfosfato) que son ligantes inorgánicos, se obtienen QD de alta calidad, tal como los formados por CdTe, CdSe, CdS y sus derivados. El uso de altas temperaturas empleando el microondas mejora sensiblemente el campo cuántico y logra acortar los tiempos de síntesis. Comparativamente con la síntesis orgánica y la acuosa resulta más barata y sencilla, obteniéndose cristales de baja toxicidad, solubles en agua y estables, haciéndolos resistentes a la degradación por enzimas o agentes químicos (Pombo Barros, 2011).

## Nanomateriales para la Detección y Remediación de Pesticidas

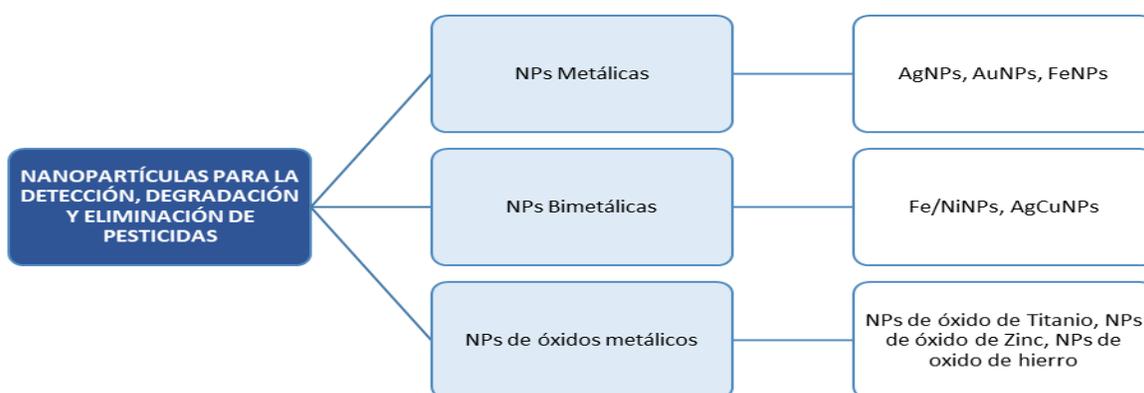
La aplicación de la nanotecnología ha permitido el desarrollo de varios tipos de nanomateriales como nanopartículas, nanocompuestos y nanotubos para la detección y remediación de pesticidas presentes en los sistemas acuosos, estos se resumen en el *Anexo 3- Nanomateriales utilizados para la detección de contaminantes*, estas nanopartículas se sintetizan en dos enfoques, como anteriormente se describió en la Figura 11, a. de arriba hacia abajo (*top-down*) que es la descomposición de los materiales y llevarlos hasta la nanoescala para obtener NPs; b. de abajo hacia arriba (*bottom-up*) es la acumulación de los átomos y moléculas del material para la elaboración de NPs. Las propiedades químicas, físicas y biológicas de las NPs, en comparación con partículas de mayor tamaño, han permitido el desarrollo de novedosas e innumerables NPs que han sido utilizadas por diferentes investigadores y centros científicos, para la detección y degradación de pesticidas. Figura 12. (Rawtani et al., 2018).

Las NPs metálicas, especialmente de metales nobles como el oro (Au), la plata (Ag), el platino (Pt) y el paladio (Pd), tienen grandes aplicaciones de remediación ambiental, igualmente la aplicación de NPs de metales de transición como el hierro (Fe), cobre (Cu) y el zinc (Zn), así se evidencia en revisión realizada por (Zhao et al., 2008), en donde a través de diferentes ensayos de biosensores colorimétricos basados en AuNPs se muestran sus posibles aplicaciones en el campo de la nanobiotecnología, estas se han utilizado en el desarrollo de nanosensores colorimétricos, aprovechando los cambios de color que se presentan por el acoplamiento del plasmón entre partículas durante la agregación de AuNPs (rojo, púrpura o azul), o la redispersión de un agregado (púrpura a rojo). Las AuNPs en agua, presentan coloración roja debido a la oscilación coherente de los electrones de superficie (plasmón de superficie localizado), inducido por el campo electromagnético incidente. Para este tipo de NPs es importante el tamaño en nm,

porque a medida que el tamaño aumenta, la luz no puede polarizar las NPs de manera homogénea, provocando un desplazamiento hacia el rojo y un ensanchamiento de ancho de banda de plasmón superficial. Es el cambio de color durante la agregación de AuNPs lo que proporciona una plataforma amplia para la detección colorimétrica basada en absorción de AuNPs.

### Figura 12.

*Nanopartículas para detección, degradación y eliminación de pesticidas.*



Nota: Adaptado de (Rawtani et al., 2018).

En detecciones de metales pesados en sistemas acuosos, la aplicación de AuNPs modificadas con ácido mercaptopropiónico (MPA), homocistina (HCys) y ácido 2,6-piridindicarboxílico (PDCA), permiten una detección rápida, fácil y fiable de iones de Hg (II), mediante el desarrollo de sensores colorimétricos que permiten la detección de Hg en tiempo real en el medio ambiente, sin embargo, el desarrollo de este método presenta un ensayo bastante complicado debido a la coordinación de los iones presentes en Hg (II) (Darbha et al., 2008). Cabe resaltar la aplicabilidad de la química de superficie única de las NPs, ha permitido su utilización para detectar y mitigar pesticidas; las reacciones redox que se dan en la superficie de

las NPs son de gran importancia en la degradación de pesticidas peligrosos a compuestos orgánicos pequeños y menos tóxicos. Igualmente, el uso de AgNPs exhiben propiedades de forma y tamaño que les proporciona propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas. Al igual que las AuNPs la modificación de estas NPs de Ag en la superficie mejora la sensibilidad y especificidad a la hora de detectar pesticidas, y se han utilizado en la detección de dipterex (insecticida OP) en distintas muestras de agua. Estas AgNPs cubiertas con citrato con acetilcolinesterasa inmovilizada forman agregados de color rosa debido a la formación de tiocolina, a partir de acetilcolina, debido a la acción enzimática de la Acetilcolinesterasa (Li et al., 2014). En estos ensayos reportados por Li et al., (2014), la acetilcolina (ATCh) es catalizada por acetilcolinesterasa (AChE) para formar tiocolina (TCh) lo cual permitió la agregación de las AgNPs, el color de estas en solución cambio de amarillo brillante a rosa, presentando un pico de absorción de UV-vis de las AgNPs a aproximadamente 400 nm que disminuyo, con la aparición simultánea de una banda de absorción a aproximadamente 520 nm. La inhibición irreversible de la actividad AChE causada por dipterex evito la agregación de AgNPs. Es así, como se desarrolló un método espectrofotométrico UV-vis para el análisis de dipterex. Este método se utilizó con éxito para analizar dipterex en diferentes muestras de agua enriquecidas, se agregaron diferentes cantidades de dipterex a las muestras de agua, recolectadas de piscinas y lagos locales, constituyéndose como un método rápido, además con capacidad de análisis in situ para monitorear los OP en diferentes aguas. Igualmente existe la posibilidad de extender la aplicación de este método a frutas y hortalizas, sin embargo, es importante que las concentraciones de ATCh sean óptimas y efectivas a la hora de realizar el análisis de Límite de Detección (LOD), ya que existe una gran desventaja cuando se adicionan grandes cantidades de ATCh, puesto que este

lleva una carga positiva que acumula gran cantidad de esta antes de la catálisis, disminuyendo el desempeño de AgNPs como una nano sonda sensible.

El uso de AgNPs como sondas colorimétricas aplicado para la detección de paraquat utilizando agregación de AgNP con carga negativa inducida por este herbicida (cargado), dio como resultado una atracción coulombica que hizo que el color cambiara de un amarillo verdoso intenso a amarillo pálido, teniendo en cuenta las concentraciones del herbicida, a su vez se evidencio recuperaciones de paraquat en muestras de agua subterránea del 93,6% y agua de canal del 95,4%, mientras que las de las muestras en plantas mostraron 89,5% para col china y 86,6% para manzana verde (Siangproh et al., 2017); este procedimiento demuestra que el método es simple, selectivo y sensible, ya que en análisis de LOD puede ser tan bajo como 0.01 ppm para la determinación del agua mediante la visualización del color del gel de sílice recubierto con paraquat.

Usualmente, la detección de pesticidas en agua se realiza mediante métodos cromatográficos, estos métodos implican altos costos y requisitos de profesionales capacitados en el manejo de equipos especializados, es así como se han desarrollado varias investigaciones en el campo de la nanotecnología, en particular el desarrollo de métodos alternativos para la detección de pesticidas en agua mediante el uso de sensores colorimétricos. En otra investigación el desarrollo de este tipo de sensores se dio utilizando vesículas de polidiacetileno (PDA) (Carioca, 2017). El PDA es un polímero anfifílico compuesto por una parte polar, cuyo grupo funcional es el ácido carboxílico, y una cola de alquilo apolar, estos polímeros se forman mediante la adición de monómeros de 1,4 diacetileno bajo radiación ultravioleta. Después de la irradiación, forman polímeros conjugados con dobles y triples enlaces (ene-ino) que se alternan en su estructura de carbono y mostrando un color azul. Esta polimerización es extremadamente

sensible a las interacciones hidrofóbicas, para esto se prepararon vesículas de 10,12 ácido pentacosadinoico (PCDA) + 10,12-ácido tricosadinoico (TRCDA) con adición de esfingomieline (ES) + colesterol (CO) y se utilizaron pesticidas como Roundup Original® (*Glifosato*) 52% m / v (Sigma®), Tacora® 250EW (*Tebuconazol*) 25% m / v, y Decis® 25EC (*Deltametrina*) 2.5% m / v (*insecticida*) y FEGATEX® (*Cloruro de Benzalconio*), las vesículas PCDA / TRCDA ES / CO mostraron transición colorimétrica a las 24 horas, para suspensiones diluidas de los cuatro plaguicidas evaluados, aunque, no se permitió comprobar la efectividad de las vesículas para detección de glifosato, tebuconazol, deltametrina y cloruro de benzalconio visible en las concentraciones evaluadas en el estudio. A pesar de los resultados para detección visible a bajas concentraciones, las suspensiones mostraron mayor respuesta colorimétrica, en la mayoría de los resultados, indicando que el sensor requiere del uso de equipos para detectar las variaciones de color, lo que infiere, que es necesario el uso de altas concentraciones y en condiciones diferentes a las presentadas en este estudio (Carioca, 2017).

En otro estudio realizado por Liang et al. (2013), se encontró un método de detección rápida colorimétrica de plaguicidas organofosforados y agentes nerviosos, basado en miméticos de peroxidasa, nanopartículas magnéticas (MNP) de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Este ensayo se compuso por MNP, AChE y colina oxidasa (CHO). Las enzimas AChE y CHO catalizan la formación de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en presencia de acetilcolina, que activa las MNP para catalizar la oxidación de sustratos colorimétricos para así generar una reacción representada en la percepción de color que es visible y puede ser monitoreada cuantitativamente por absorción espectrofotométrica. Los compuestos OP en este ensayo se controlan de forma rápida y sensible con límites de detección de 10 nM para metilarioxón, 5  $\mu\text{M}$  para acefato y 1 nM para sarín, este es más sensible que los métodos tradicionales basados en actividad enzimática debido a la actividad catalítica altamente efectiva

de MNPs, este puede ser un método de detección simple y económico, además de práctico y rápido.

Existen varios estudios sobre aplicaciones de nanosensores colorimétricos a la detección de pesticidas OP y otros contaminantes presentes en los sistemas acuosos, donde se nombran y clasifican diferentes usos de los nanomateriales y síntesis de nanopartículas, como medio de remediación para la contaminación dada por las diferentes prácticas agrícolas. En el *Anexo 3 - Nanomateriales utilizados para la detección de contaminantes*, se presentan algunas investigaciones relacionadas, en las que se encuentran aplicaciones con resultados positivos y negativos, esto muestra la importancia de la nanotecnología y su búsqueda en la optimización de procesos que mejoran la vida, con sus distintos ecosistemas y sistemas y por ende la salud humana.

### **Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Nanosensores Colorimétricos**

Los métodos ópticos para detección de compuestos OP en sistemas acuosos, en particular los nanosensores colorimétricos presentan muchas ventajas como el no requerir de ningún procesamiento electrónico de la señal. Aunque se presenten cambios visibles al ojo humano, deben utilizarse equipos espectrofotométricos en los rangos de UV-Visible que permitan realizar análisis de datos más fiables, porque a partir del estudio del espectro y su variación en presencia del analito se puede dar respuesta de mejor manera al cambio de color del sistema presentado, sin depender de la subjetividad del operario, ya que en los sensores colorimétricos la propia señal del transductor es el cambio de color, y puede ser interpretada por el analista (Tancredi, 2011).

Los análisis químicos estaban centralizados durante mucho tiempo en los laboratorios, lejos de los sitios de muestreo y sólo podían ser realizados por personal especializado. Este tipo de nanosensores buscan reemplazar los grandes y altamente concentrados equipos y centros de procesamiento, por instrumentos móviles que permitan realizar análisis en los lugares de muestreo. En especial, los sensores colorimétricos no requieren ningún tipo de equipo transductor, son automáticos y transportables. Aunque, uno de los problemas de los sensores colorimétricos aduce a que muchas veces es imposible su utilización como instrumentos de cuantificación; en algunos sistemas resulta complejo interpretar las distintas transiciones cromáticas. El carácter de la señal de transducción en muchas circunstancias hace imposible su utilización como instrumento cuantitativo, especialmente si no viene acompañado de instrumentos informáticos que realicen análisis del cambio de color, por lo tanto, en los casos de la fabricación de nanosensores colorimétricos elaborados con NPs metálicas, las ventajas son los bajos costos de los

reactivos, fácil fabricación, y detección rápida, además pueden ser utilizadas no solamente para detección sino también para remediación (Rawtani et al., 2018).

## **Aplicación de la Nanotecnología al Desarrollo de los Nanosensores Colorimétricos en los Sistemas Acuosa**

La nanotecnología ha venido percibiéndose como una alternativa en el tratamiento de sistemas acuosa; el tamaño y características de los nanomateriales han permitido que el campo de esta ciencia sea bastante amplio, sin embargo, deben entrar en consideración las limitantes de su uso, pues también existen estudios toxicológicos sobre el efecto de estos en los humanos y ambiente, este efecto no ha sido analizado a profundidad (Chávez-Lizárraga, 2018).

Entre las distintas alternativas que nos brinda la nanotecnología para la detección de OP nos encontramos con el diseño de nanosensores ópticos, que son quimiosensores o reactivos colorimétricos o fluorimétricos, considerándose como uno de los medios más convenientes y sencillos de detección química, que utiliza señales ópticas (Obare et al., 2010). El desarrollo de nanomateriales y técnicas de síntesis de NPs variadas, sólo han sido dispuestas por medio del avance de la nanotecnología a través de los años, las diferentes investigaciones, han permitido que esta tecnología llegue no sólo a las grandes compañías que tienen la disposición de utilizar laboratorios que pueden realizar análisis costosos, sino que puedan ser utilizados in situ, de manera rápida y eficiente, por cualquier agricultor o pequeña y mediana empresa. Existen muchas nanopartículas de origen natural, arcillas, minerales degradados, materia orgánica y óxidos metálicos, otras de origen incidental que se generan de manera incontrolada o pueden surgir como subproductos de la quema de un combustible, de la industria, prácticas agrícolas, meteorización entre otros. Igualmente existen NP diseñadas, que son fabricadas intencionalmente con propiedades y composiciones específicas (Saini et al., 2017a).

Los nanomateriales se han clasificado en nanopartículas, nanotubos y nanocompuestos que han sido utilizados para la detección de pesticidas, la manipulación de átomos y moléculas

para la fabricación de materiales con dimensiones en el rango de nanómetros, se han constituido en los últimos años objeto de estudio para la detección de contaminantes (Rawtani et al., 2018). El pequeño tamaño, la alta relación superficie-volumen, las propiedades fisicoquímicas y la alta especificidad de destino de los nanomateriales han contribuido al desarrollo de sensores colorimétricos para la detección de pesticidas. El desarrollo y la obtención de NPs metálicas, bimetalicas y las de óxido metálico son las principales categorías utilizadas en la detección de pesticidas. NP de diferentes metales como las de oro (Au), plata (Ag), platino (Pt) y paladio (Pd), entre otras, han contribuido a diversas aplicaciones en el campo de la remediación ambiental, las propiedades ópticas específicas de AuNP, su química superficial única, han permitido su empleo no solo en la detección, sino también en la degradación de algunos pesticidas, nanopartículas como AuNPs son muy conocidas por exponer diferentes colores con los cambios en su tamaño, estos cambios de color durante los estados de aglomeración las convierten en un nanomaterial óptico e ideal para detectar varios analitos (Rawtani et al., 2018). Son muchas las aportaciones en el desarrollo de la nanotecnología a través del tiempo, en cuanto al diseño de nanosensores colorimétricos en la detección de pesticidas en sistemas acuosos, e igualmente, aunque no son muchas las investigaciones encontradas en cuanto a la aplicabilidad en estos sistemas, la nanotecnología nos presenta una alta gama de nanomateriales que pueden ser aplicados.

## Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica de variadas fuentes, se logra identificar los tipos de sensores utilizados para la detección de pesticidas organofosforados, la importancia de estos como métodos de detección in situ que pueden ser utilizados por los agricultores sin requerir de personal especializado para su uso. Sin embargo, aunque variadas las aplicaciones y uso de nanomateriales para la elaboración de nanosensores colorimétricos, se observó que existen pocos estudios enfocados a la detección de pesticidas organofosforados en medios acuáticos. Existe mucha información sobre tratamiento de aguas residuales, pero sólo para analitos como plomo, mercurio, entre otros, que se catalogan dentro de los metales pesados, sin embargo, la información bibliográfica sobre análisis de pesticidas organofosforados y la aplicabilidad de los nanosensores colorimétricos es poca y debido al uso de estos en la industria agrícola, representan un problema de contaminación ambiental del agua, específicamente en los sistemas acuíferos, aguas subterráneas, que pueden verse afectadas mediante el proceso de escorrentía, generada en los ciclos normales del agua por deposición incontrolada de pesticidas organofosforados en las prácticas agrícolas. Ahora bien, aunque existen entes gubernamentales de control de prácticas agrícolas, políticas y normas establecidas, se evidencia una dicotomía entre los estándares de calidad exigidos a los agricultores y la necesidad de conservar el medio ambiente y la salud humana.

Se identificaron algunas técnicas aplicadas a la elaboración y síntesis de nanopartículas de acuerdo con el campo de aplicación, como el método sol-gel, el método sólido, el método hidrotérmico, síntesis coloidal o síntesis inorgánica; algunos, más estructurados y otros más simples, aunque su aplicación directa a la detección in situ de pesticidas no se logra evidenciar en muestras acuosas, sino directamente a algunas frutas y alimentos. Cabe mencionar que desde

el punto de vista de la Química heterogénea y Homogénea estos sistemas y técnicas de aplicación y elaboración de nanopartículas se pueden constituir en una solución que propenda por la remediación y identificación de contaminantes OP, sin embargo, las nanopartículas dispersas no pueden ser eliminadas con facilidad y pueden constituirse en un problema más de contaminación, por lo tanto, se hace necesario desarrollar estrategias que posibiliten su eliminación.

Es importante tener en cuenta que el desarrollo de nanosensores colorimétricos, que además de mostrarse como un método de detección de plaguicidas, en algunos artículos según el tipo de nanomateriales utilizados podrían presentarse como métodos de remediación al medio ambiente, como lo es la utilización de AuNPs y otras NPs metálicas, debido a sus estados de aglomeración, útiles para la filtración, separación de agentes contaminantes en los sistemas acuáticos. Según la revisión bibliográfica se puede considerar que las AuNPs y AgNPs son las más ampliamente utilizadas y propicias en la fabricación de nanosensores colorimétricos debido a su tamaño que oscila entre menos de los 20nm para AuNPs y permiten una fuerte banda de absorción en 520nm. Debido a la alta sensibilidad de estas NPs se han evidenciado diversos estudios sobre sus aplicaciones en tratamientos médicos. (Gómez Varela, 2015).

En las revisiones bibliográficas los compuestos organofosforados OP, varían de diferentes clasificaciones en grados de toxicidad, estas clasificaciones se basan en la toxicidad aguda por vía oral y dérmica para la rata, cuando la dosis letal mediana ( $DL_{50}$ ) es tan alta que lo sitúa en una clase restrictiva según lo establecido por la OMS, de ahí la importancia que se debe considerar a los problemas generados en la salud humana y el medio ambiente, como son la inhibición de la AChE y problemas de disminución en la población de algunos insectos que son importantes en la polinización. Se lograron Identificar las diferentes técnicas de caracterización,

materiales y métodos de síntesis de nanosensores colorimétricos para la detección de compuestos organofosforados, la importancia del avance de la nanotecnología y la comprensión de sus usos, el desarrollo e investigaciones innumerables del surgimiento de nuevos nanomateriales y metodologías de síntesis y evaluación de diferentes sistemas, así como su aplicabilidad, aunque, falta un enfoque mayor en la divulgación de este tipo de tecnología que todavía es ajena al pequeño agricultor.

Aunque se describen muchos métodos de síntesis y aplicación de nanosensores colorimétricos como métodos de detección in situ, que podrían proporcionar a la mediana y pequeña empresa, alternativas de mejoramiento en la calidad de sus productos y evaluación de contaminantes en sus prácticas agrícolas, todavía no es claro cómo acceder a estos análisis. Las ventajas de poder acceder a este tipo de conocimiento, e implementar su uso se hace necesario cada día más y aunque los sensores colorimétricos por sí solos representen una respuesta cualitativa visible de presencia o no de pesticidas, se hace necesario desarrollar e implementar sistemas a estos que los conviertan, no sólo en una respuesta de presencia, sino de cuantificación de estos.

Es evidente y admirable como el desarrollo y evolución de la nanotecnología ha influido en casi todos los aspectos científicos, el desarrollo de los nanosensores colorimétricos no solo se ha implementado en la agricultura, sino en la medicina, en la biología y otras disciplinas, buscando alternativas que mejoren la identificación y análisis de presencia de diversas sustancias. A través de las diversas lecturas se logra identificar que la mayoría de los sensores colorimétricos son basados en nanopartículas de oro, esto debido a que presentan un tamaño similar a la onda de luz visible, lo que permite que interactúe con esta dependiendo de su tamaño y forma; se han desarrollado aplicaciones en la detección de pesticidas presentes en alimentos, en

el caso de los sistemas acuáticos la aplicabilidad de estos ensayos es muy poca, sin embargo, podrían ser considerados como una alternativa inicial de identificación de analitos presentes en los vertimientos industriales realizados a los afluentes, que se constituyen en un problema ambiental y del que no se ha realizado controles pertinentes.

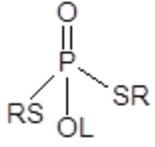
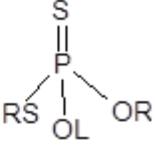
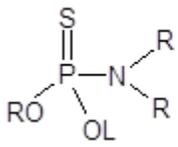
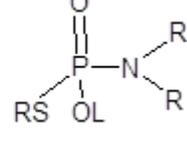
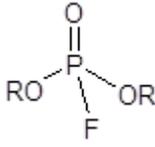
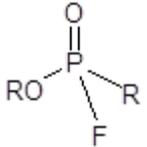
## Anexos

## Anexo I.

## Estructura general de los OP.

Tipo	Estructura química	Ejemplos
Estructura general	$\begin{array}{c} \text{O ou S} \\    \\ \text{R}_1 - \text{P} - \text{R}_2 \\   \\ \text{OL} \end{array}$	
Fosfatos	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RO} - \text{P} - \text{OR} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	clorfenvinfós, diclorvos, monocrotofós, fosfato de tri-o-cresil
Fosfonatos	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RO} - \text{P} - \text{R} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	triclorfon
Fosforotioatos (S=)	$\begin{array}{c} \text{S} \\    \\ \text{RO} - \text{P} - \text{OR} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	bromofós, diazinon, fention, paration, pirimifós-metil
Fosfonotioatos (S=)	$\begin{array}{c} \text{S} \\    \\ \text{RO} - \text{P} - \text{R} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	EPN, leptofós
Fosforotioatos (S-substituídos)	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RS} - \text{P} - \text{OR} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	demeton-S-metílico, ecotiopato
Fosfonotioatos (S-substituídos)	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RS} - \text{P} - \text{R} \\   \\ \text{OL} \end{array}$	VX

---

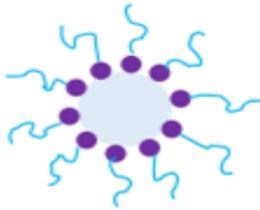
Fosforoditioatos	 ou 	azinfós-etílico, azinfós- metílico, dimetoato, malatión
Fosforamiditioatos	 ou 	metamidofós, isofenfós
Fosforofluoridatos		diisopropil fluorofosfato (DFP)
Fosfonofluoridatos		ciclosarin, sarin, soman

---

Nota: Adaptado de (Alvarenga, 2013)

## Anexo 2.

### *Tipos de Nanopartículas.*

Nanopartículas	Descripción	Aplicaciones / Representación*
Nanocápsulas	Sistema hueco o vesicular formado por una membrana polimérica que rodea un fármaco o principio activo.	En la nanotecnología farmacéutica como recubrimientos poliméricos. (Martel Estrada et al., 2018) 
Nanoesferas	Sistema de matriz en el cual el principio activo se dispersa física y uniformemente.	Encapsular sustancias para liberarlas de forma controlada. (CSIC-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2009) 
Micelas	Copolímeros de bloque anfifílicos que pueden autoasociarse en una solución acuosa.	Solubilización, estabilización y liberación de numerosos fármacos de mayor o menor complejidad estructural. (Lárez et al., 2015) 

Nanopartículas	Descripción	Aplicaciones / Representación*
Cerámica	<p>Nanoestructuras formadas a partir de sustancias inorgánicas que incluyen sílice, titanio, etc.</p>	<p>Nanopartículas sintéticas que poseen una, propiedad de superficie elevada y una naturaleza porosa. Protegen selectivamente los principios activos evitando la desnaturalización inducida por los cambios de pH y alta temperatura. Presentan compatibilidad con sistemas biológicos debido a su naturaleza inerte. (Guel et al., 2013).</p>
Liposomas	<p>Vesículas esféricas artificiales producidas a partir de fosfolípidos naturales y colesterol (Torres &amp; Seijo, 2009)</p>	<p>Utilizadas en el campo de la medicina por sus propiedades fisicoquímicas, como composición, tamaño y estabilidad del vehículo, pueden ser fácilmente modificados dependiendo de la aplicación concreta para mejorar la captura intracelular y para cambiar el perfil farmacocinético y la biodistribución. (Torres &amp; Seijo, 2009)</p>



Nanopartículas	Descripción	Aplicaciones / Representación*
Dendrímeros	<p>Un dendrímero típico está formado por una molécula central de la que salen varias “ramas”, que a su vez se ramifican, originando así una estructura tridimensional globular de capas concéntricas (Lárez et al., 2015).</p>	<div data-bbox="966 289 1205 520" data-label="Chemical-Block"> </div> <p>La presencia de grupos funcionales (tipo amino, carboxilo, hidroxilo, entre otros), en la superficie de los dendrímeros, confiere a estos agentes gran parte de su utilidad en la farmacia terapéutica. Los grupos funcionales conceden a los dendrímeros una carga determinada a pH fisiológico (aniónico o catiónico). Sus aplicaciones en la vía tópica ocular, ya que presentan una alta interacción con las mucinas del epitelio de la córnea que se encuentran cargadas negativamente en condiciones fisiológicas por la presencia de grupos siálicos (Lárez et al., 2015).</p>

Nanopartículas	Descripción	Aplicaciones / Representación*
<p data-bbox="272 1115 456 1276">Nanopartículas sólidas lipídicas (NSL)</p>	<p data-bbox="500 669 781 1650">Son sistemas coloidales con una alta proporción de agua (70-95%), elaborados a partir de lípidos fisiológicos sólidos que tienden a gelificar y a expulsar el fármaco durante el almacenamiento, presentan capacidad de carga limitada, son biodegradables y tienen buena tolerancia (Garzón S. et al., 2008).</p>	<div data-bbox="935 285 1230 562" style="text-align: center;"> </div> <p data-bbox="829 821 1341 1262">Las propiedades y la estabilidad de las SLN se han mejorado mediante la adición de lípidos líquidos en los que el fármaco generalmente es más soluble, dando lugar a nuevos sistemas conocidos como acarreadores lipídicos nanoestructurados (NLC) (Garzón S. et al., 2008)</p> <div data-bbox="967 1331 1208 1562" style="text-align: center;"> </div>

Nota: Adaptado de Méndez, P. (2017).

### Anexo 3.

*Nanomateriales utilizados para la detección de pesticidas, (autoría propia).*

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
GSH-NP, DMSA-NP, APTES-NP	Dicofol y Dimetoato	Nanosensores fluorescentes	Mayor eficiencia de fluorescencia en la detección de Dicofol con GSH-NP	Aguas subterráneas	Fluorescent cadmium sulfide nanoparticles for selective and sensitive detection of toxic pesticides in aqueous medium (Walia & Acharya, 2014)
AuNP	Glifosato (Gly)	Nanosensores colorimétricos	Eficiencia de detección de los Gly representada en	Sobre la superficie de las plantas	In situ colorimetric detection of glyphosate on plant

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
<p>Nanopartículas metálicas (AuNPs,)</p> <p>Nanopartículas semiconductoras (QD)</p>	<p>OC y OP</p> <p>(Varios)</p>	<p>Sistemas de inmunoensayos utilizando sensores ópticos (colorimétricos y fluorescentes)</p>	<p>cambios de color. Un método de detección portátil ya que se puede realizar In situ.</p> <p>La aplicación de este tipo de nanopartículas en inmunoensayos, permiten una amplificación superior de las señales, en comparación con</p>	<p>sin extracción de plaguicidas</p> <p>Distintas aplicaciones para detección y destrucción en aguas subterráneas, alimentos, suelos, etc.</p>	<p>tissues using cysteamine-modified gold nanoparticles (Tu et al., 2019)</p> <p>Nanomaterials for Sensing and Destroying Pesticides, (Aragay et al., 2012)</p>

<b>Nanomaterial Utilizado</b>	<b>Contaminante a Identificar</b>	<b>Tipo De Nanosensor</b>	<b>Resultados</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Bibliografía</b>
			otros marcadores tradicionales como los colorantes inorgánicos. Se consideran los QD como los marcadores fluorescentes más utilizados y eficientes, debido a su fotoestabilidad y propiedades de emisión ajustables.		

---

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
AgNPrs (nanoprismas de plata)	Determinación de iones cloruro (Cl <sup>-</sup> )	Sensores colorimétricos basados en papel filtro	Se basa en el grabado oxidativo de AgNPrs nanoesferas de plata más pequeñas (AgNPss) por Cl <sup>-</sup> . que en presencia de Cl <sup>-</sup> , presentan un cambio de color distintivo de los AgNPrs de violeta oscuro a rojo. Se observa rápidamente a	Aguas naturales	Simple and selective paper-based colorimetric sensor for determination of chloride ion in environmental samples using label-free silver nanoprism. (Yakoh et al., 2018)

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
AuNRs (Nanobarras de oro)	Metales pesados - As (III)	Sonda Colorimétrica	simple vista en 5 minutos sin el requisito de modificación de la superficie. Desarrollo de un método colorimétrico sencillo, rápido, sensible y selectivo, con un excelente desempeño de determinación de	Aguas ambientales (ríos, grifo, lago)	A Colorimetric Probe Based on Functionalized Gold Nanorods for Sensitive and Selective Detection of As(III) Ions. (Ge et al., 2018)

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
Nanopartículas de oro modificadas con rodamina B (RB- AuNP)	Clorpirifos (CP), etoprofos (EP), profenofos (PF), triclorfón (TC), ometoato (OT), monocrotofos (MC),	Sensor modal simple y dual (colorimétrico y fluorescente)	As III en muestras de agua ambiental por espectrofotometría sin el uso de instrumentos especiales. Se cree que este sencillo ensayo puede ser útil para controlar el etoprofos in situ, especialmente en combinación con	Agua de grifo	A Simple Colorimetric and Fluorescent Sensor to Detect Organophosphate Pesticides Based on Adenosine

<b>Nanomaterial Utilizado</b>	<b>Contaminante a Identificar</b>	<b>Tipo De Nanosensor</b>	<b>Resultados</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Bibliografía</b>
	isocarbofos (IC) y malatión (MT)		otros métodos, como las técnicas de laboratorio en chip. ensayos en etoprofos, profenofos y el clorpirifos inducían la agregación de las AuNP cubiertas con citrato, evidenciándose cambios de color en las AuNP de rojo a púrpura y		Triphosphate-Modified Gold Nanoparticles. (Li et al., 2018).

---

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
AuNP nanopartículas de oro cubiertas con ácido 11-mercaptoundecanoico (MUA)	Detección de múltiples iones de metales pesados tóxicos ( $Hg^{2+}$ , $CD^{2+}$ , $Fe^{3+}$ , $Pb^{2+}$ , $Al^{3+}$ , $Cu^{2+}$ y $Cr^{3+}$ )	Matriz de sensores colorimétricos	azul. Las soluciones de AuNP no cambiaron de color en presencia de los otros pesticidas. La respuesta colorimétrica combinatoria de todos los canales de la matriz de sensores (es decir, cambio de color en cada AuNP y	Aguas	Colorimetric Sensor Array Based on Gold Nanoparticles and Amino Acids for Identification of Toxic Metal Ions in

<b>Nanomaterial Utilizado</b>	<b>Contaminante a Identificar</b>	<b>Tipo De Nanosensor</b>	<b>Resultados</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Bibliografía</b>
			<p>parejas de aminoácidos) permite la discriminación a simple vista de todos los iones metálicos probados en este estudio con excelente selectividad. El uso de AuNPs cubiertas con MUA no satisface el límite de detección</p>		<p>Water. (Sener et al., 2014).</p>

---

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
benzodipirido [3,2-a: 2', 3'-c] fenazina (BDPPZ) y 3,6-dimetilbenzodipirido-[3,2-a: 2', 3'- c] fenazina (DM-BDPPZ)	Fentión, Malatión y Etión	Biosensores que proporcionan señales electroquímicas y fluorescentes	necesario (alrededor de un nivel bajo de nM).  La diferencia en las señales de fluorescencia y electroquímicas producidas por la interacción del compuesto sensor con cada uno de los plaguicidas OP proporciona un	Suelos y aguas, aunque no se evidencian detecciones in situ de estos OP.	Dual fluorescence and electrochemical detection of the organophosphorus pesticides—Ethion, malathion and fenthion. (Guo et al., 2011).

<b>Nanomaterial Utilizado</b>	<b>Contaminante a Identificar</b>	<b>Tipo De Nanosensor</b>	<b>Resultados</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Bibliografía</b>
			<p>medio para diferenciar entre los tres plaguicidas. Los sensores que proporcionan salidas de señal independientes duales son ventajosos ya que minimizan el riesgo de señales falsas positivas.</p>		

---

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
Nanopartícula magnética de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .	Acefato y metil-paroxón como plaguicidas organofosforados representativos y el agente nervioso Sarin	Método colorimétrico basado en miméticos de peroxidasa para la detección rápida de pesticidas organofosforados y agentes nerviosos	Al emplear la actividad de imitación de la peroxidasa de las MNP, el ensayo colorimétrico desarrollado tiene el potencial de convertirse en una herramienta de detección para la evaluación rápida y sensible de la neurotoxicidad de	Se realizan ensayos en soluciones acuosas en laboratorio, no in situ. Aplicaciones clínicas.	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Magnetic Nanoparticle Peroxidase Mimetic-Based Colorimetric Assay for the Rapid Detection of Organophosphorus Pesticide and Nerve Agent. (Liang et al., 2013).

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
			compuestos organofosforados		
Nanopartículas de oro modificadas con ácido mercaptopropiónico (MPA), homocistina (HCys) y ácido 2,6-piridindicarboxílico (PDCA).	Reconocimiento de mercurio (II) a un nivel de 5 ppb en solución acuosa	Ensayo HRS altamente selectivo y sensible para el reconocimiento de mercurio (II) a un nivel de 5 ppb en solución acuosa utilizando nanopartículas de oro modificadas con ácido	Se muestra que el ensayo HRS para monitorear iones Hg (II) usando nanopartículas de oro modificadas con MPA-Cys-PDCA tiene una excelente selectividad sobre los álcalis,	Soluciones acuosas de muestras ambientales	Selective Detection of Mercury (II) Ion Using Nonlinear Optical Properties of Gold Nanoparticles. (Darbha et al., 2008).

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
Nanopartículas de plata cubiertas con citrato (AgNP cubiertas con citrato) y acetilcolina (ATCh).	OP dipterex	mercaptopropiónico (MPA), homocistina (HCys) y ácido 2,6-piridindicarboxílico (PDCA).  Sensor colorimétrico	alcalinotérreos ( $\text{Li}^+$ , $\text{N/A}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ ) e iones de metales pesados de transición ( $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Pb}^+$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{CD}^{2+}$ ).  Se desarrolló un método espectrofotométrico UV-vis para el análisis de dipterex.A396	Aguas	Unmodified silver nanoparticles for rapid analysis of theorganophosphorus pesticide, dipterex, often found in

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
			<p>nanómetro/A520</p> <p>nanómetro, se</p> <p>encontró una</p> <p>relación lineal con</p> <p>la concentración de</p> <p>dipterex en el rango</p> <p>de 0.25-37.5 ng</p> <p>mL<sup>-1</sup> con un límite</p> <p>de detección de</p> <p>0,18 ng mL<sup>-1</sup>. Este</p> <p>método se utilizó</p> <p>con éxito para</p> <p>analizar dipterex en</p> <p>diferentes muestras</p>		<p>different waters.</p> <p>(Li et al., 2014).</p>

---

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
<p>Nuevo ensayo colorimétrico para la detección de paraquat en perlas de sílice utilizando nanopartículas de plata cargadas negativamente</p>	<p>OP y OC (Paraquat)</p>	<p>AgNP cargados como sonda colorimétrica</p>	<p>de agua enriquecidas</p> <p>El método es simple, selectivo y sensible. El LOD puede ser tan bajo como 0.01 ppm para la determinación del agua mediante la visualización del color del gel de</p>	<p>Aguas</p>	<p>Novel colorimetric assay for paraquat detection on silica bead using negatively charged silver nanoparticles. (Siangproh et al., 2017).</p>

Nanomaterial Utilizado	Contaminante a Identificar	Tipo De Nanosensor	Resultados	Aplicaciones	Bibliografía
Sensor colorimétrico basado en polidiacetileno para la detección de pesticidas en agua.	Roundup Original® (Glifosato) 52% m / v (Sigma®), Tacora® 250EW (Tebuconazol) 25% m / v, y Decis® 25EC (Deltametrina) 2.5% m / v ( insecticida) y FEGATEX®	Sensor colorimétrico utilizando las vesículas de polidiacetileno (PDA).	sílice recubierto con paraquat. Este método aunque muy innovador no permitió la comprobación de la efectividad de las vesículas PDA, tal vez, por las mediciones en las concentraciones y las condiciones	Aguas	Sensor Colorimétrico à base de Polidiacetileno para detecção de agrotóxicos em água. (Carioca, 2017).

<b>Nanomaterial Utilizado</b>	<b>Contaminante a Identificar</b>	<b>Tipo De Nanosensor</b>	<b>Resultados</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Bibliografía</b>
	(Cloruro de Benzalconio)		presentadas en este estudio.		

---

### Referencias Bibliográficas

- Alvarenga, N. (2013). Biodegradação dos pesticidas clorpirifós , metil paration e profenofós por fungos de origem marinha. Dissertação De Mestrado, 161.
- Aragay, G., Pino, F., & Merkoçi, A. (2012). Nanomaterials for sensing and destroying pesticides. *Chemical Reviews*, 112(10), 5317–5338. <https://doi.org/10.1021/cr300020c>
- Benuszak, J., Laurent, M., & Chauzat, M. P. (2017). The exposure of honey bees (*Apis mellifera*; Hymenoptera: Apidae) to pesticides: Room for improvement in research. *Science of the Total Environment*, 587–588, 423–438. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.062>
- Betancourt, R., & Diaz, O. (2018). Los pesticidas: clasificación, necesidad de un manejo integrado y alternativas para reducir su consumo indebido: una revisión. *Revista Científica Agroecosistemas*, September, 14–30.
- Borja Borja, J. M., & Rojas Oviedo, B. S. (2020). Nanomaterials : Synthesis Methods *Nanomateriais : métodos de síntese. Polo Del Conocimiento*, 5(08), 426–445. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1597>
- Boujon, P. (2014). Tesis Doctoral Estudio de la contaminación de aguas subterráneas por métodos geofísicos e hidrogeológicos.
- Cano, L. E. (2008). Simulación de Nanosensores para detectar partículas contaminantes utilizando Sistemas de Información. *Ingeniería (Bogotá)*, 13(2), 29–35. <https://doi.org/10.14483/23448393.2667>
- Carioca, L. J. (2017). Sensor colorimétrico à base de polidiacetileno para detecção de agrotóxicos em água. 41.

- Carmona, M. (2010). Los organofosforados. Académico de Número de La Real Academia Nacional de Farmacia, 311–429.
- Caro-Gamboa, L. J., Forero-Castro, M., & Dallo-Báez, A. E. (2020). Inhibición de la colinesterasa como biomarcador para la vigilancia de población ocupacionalmente expuesta a plaguicidas organofosforados. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1–23.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol21\\_num3\\_art:1562](https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1562)
- Chávez-Lizárraga, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52–61. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100052>
- Cortina, C., Fonnegra, F., Pineda, M., Muñoz, P., Fonnegra, R., Díaz, Z., Efectos, J. P., Campuzano Cortina, C., María, L., Pineda, K. M., Palacio Muñoz, M., Fonnegra, J. R., & Pablo, J. (2017). Efectos de la intoxicación por glifosato en la población agrícola: revisión de tema Effects of glyphosate intoxication in farming population: topic review. *Rev CES Salud Pública*, 8(1), 121–133.
- CSIC-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2009). Un método permite encapsular sustancias en nanoesferas parcialmente metálicas. <https://rdsic.dicat.csic.es/tecnologia-de-materiales-2/99-ofertas-tecnologicas/301-un-metodo-permite-encapsular-sustancias-en-nanoesferas-parcialmente-metalicas>
- Cuenca Rompinelli, M. T. (2019). Destino Emerging Pollutants : Origin and Destination.
- Darbha, G. K., Singh, A. K., Rai, U. S., Yu, E., Yu, H., & Ray, P. C. (2008). Selective detection of mercury (II) ion using nonlinear optical properties of gold nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 130(25), 8038–8043. <https://doi.org/10.1021/ja801412b>

- Esteban Uriel, C. G. (2021). Síntesis y caracterización de hidrogeles híbridos Acrilamida/ATP/Naftalimidias como sensor óptico para la detección de Pesticidas Organofosforados (pp. 1–124).
- Fernandez, D., Mancipe, L. C., & Fernández, D. C. (2010). Intoxicación por Organofosforados. *Revista*, 18(49), 84–92.
- Garzón S., M. D. L., Hernández L., A., Vázquez, M. L., Villafuerte R., L., & García F., B. (2008). Preparación de nanopartículas sólidas lipídicas (SLN), y de acarreadores lipídicos nanoestructurados (NLC). *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, 39(4), 50–66.
- Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), 75–80. <https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191>
- Gómez Varela, O. (2015). Nanosensores plasmónicos en la detección colorimétrica de algunas bases pirimidínicas y derivados. *Repositorio Universidad de La Laguna*, 40.
- Guel, M. L. A., Jiménez, L. D., & Hernández, D. C. (2013). Materiales nanoestructurados cerámicos como vehículo para la liberación de principios activos. *Avances En Química*, 8(3), 171–177.
- Hao, L., Liu, X., Wang, J., Wang, C., Wu, Q., & Wang, Z. (2015). Use of ZIF-8-derived nanoporous carbon as the adsorbent for the solid phase extraction of carbamate pesticides prior to high-performance liquid chromatographic analysis. *Talanta*, 142, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.04.034>
- IDEAM. (2015). Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en colombia.

- Instituto Nacional de Salud. (2020). Vigilancia brotes de enfermedades transmitidas por alimentos, Colombia, semana epidemiológica 04 de 2021. *BES Boletín Epidemiológico Semanal*, 31, 1–26.
- Julia Bujes Garrido. (2013). “Estudio de Sensores Electroquímicos. Química Avanzada Especialidad En Nuevos Materiales.
- Kannan, P., & Guo, L. (2020). Nanosensors for food safety. In *Nanosensors for Smart Cities*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819870-4.00019-0>
- Kumar, P., Kim, K. H., & Deep, A. (2015). Recent advancements in sensing techniques based on functional materials for organophosphate pesticides. *Biosensors and Bioelectronics*, 70, 469–481. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.03.066>
- Laila, R. S. (2010). Fluorescencia y el uso de Fluoroionóforos Vis-Nir. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Lárez, C., Koteich, S., & Floralba, L. (2015). Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones. *Nanotecnología: Fundamentos y Aplicaciones*, November 2015, 203–222.
- Li, Z., Wang, Y., Ni, Y., & Kokot, S. (2014). Unmodified silver nanoparticles for rapid analysis of the organophosphorus pesticide, dipterex, often found in different waters. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 193, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.096>
- Lizarazo-Salcedo, C. G., González-Jiménez, E. E., Arias-Portela, C. Y., & Guarguati-Ariza, J. (2018). Nanomateriales: un acercamiento a lo básico. *Medicina Y Seguridad Del Trabajo*, 64(251), 109–118.
- Martel Estrada, S. A., Vargas Requena, C. L., Jiménez Vega, F., Martínez Pérez, C., Santos Rodríguez, E., Salazar Vázquez, D. A., Legarreta Arias, K. A., & Sánchez Serrano, J. E.

- (2018). Síntesis y caracterización de nanocápsulas para aplicaciones potenciales en el tratamiento de cáncer de mama. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 1–40.
- Méndez, P. (2017). Preparación y caracterización de partículas Auto-ensambladas a partir de quitosano-ácido oléico:ácido hialurónico portadoras de Celecoxib para el tratamiento de enfermedades reumáticas. Instituto de Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Antioquia.
- Obare, S. O., De, C., Guo, W., Haywood, T. L., Samuels, T. A., Adams, C. P., Masika, N. O., Murray, D. H., Anderson, G. A., Campbell, K., & Fletcher, K. (2010). Fluorescent chemosensors for toxic organophosphorus pesticides: A review. *Sensors*, 10(7), 7018–7043. <https://doi.org/10.3390/s100707018>
- OMS, & FAO. (2019). Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas. Directrices sobre Plaguicidas Altamente Peligrosos.
- Organización Mundial de la Salud. (2019). Clasificación recomendada por la OMS de los plaguicidas por el peligro que presentan y directrices para la clasificación 2019 (Vol. 1).
- Ortega, J. (n.d.). *Articulo\_Sensores\_y\_Biosensores\_2085.pdf*.
- Pablo Tancredi. (2011). Desarrollo de un Sensor Colorimétrico para Detectar Plomo. 14.
- Pérez González, L. L., & Pérez Acosta, N. D. (2016). El modelo atómico de Bohr y el desarrollo de la nanociencia en el cuidado de la salud. *Acta Médica Del Centro*, 10(2), 69–81.
- Pombo Barros, V. y G. villaescusa V. (2011). Puntos Cuánticos: nueva aportación de la nanotecnología en investigación y medicina. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias* 2011, 5(1), 69–102.

- Rawtani, D., Khatri, N., Tyagi, S., & Pandey, G. (2018). Nanotechnology-based recent approaches for sensing and remediation of pesticides. *Journal of Environmental Management*, 206, 749–762. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.037>
- Rojas-Rodríguez, R., Usero-García, J., & Morillo-Aguado, J. (2012). Desarrollo de metodos para la reducción de la contaminación por plaguicidas en aguas subterráneas mediante la adición de residuos orgánicos a los suelos (Tesis de doctorado). 332.
- Saini, R. K., Bagri, L. P., & Bajpai, A. K. (2017a). Smart nanosensors for pesticide detection. In *New Pesticides and Soil Sensors*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804299-1.00015-1>
- Saini, R. K., Bagri, L. P., & Bajpai, A. K. (2017b). Smart nanosensors for pesticide detection. In *New Pesticides and Soil Sensors*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804299-1.00015-1>
- Sener, G., Uzun, L., & Denizli, A. (2014). Colorimetric sensor array based on gold nanoparticles and amino acids for identification of toxic metal ions in water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6(21), 18395–18400. <https://doi.org/10.1021/am5071283>
- Siangproh, W., Somboonsuk, T., Chailapakul, O., & Songsrirote, K. (2017). Novel colorimetric assay for paraquat detection on-silica bead using negatively charged silver nanoparticles. *Talanta*, 174, 448–453. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.06.045>
- Silva, E., Villarreal, M. E., Cárdenas, O., Cristancho, C. A., Murillo, C., Salgado, M. A., & Nava, G. (2015). Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, 2012. *Biomedica*, 35(3), 152–166. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2538>

- Steffens, C., Steffens, J., Marcia, A., Manzoli, A., & Leite, F. L. (2017). Nanosensors for Detection. In *New Pesticides and Soil Sensors*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804299-1/00017-5>
- Tang, L., Zeng, G. M., Shen, G. L., Li, Y. P., Zhang, Y., & Huang, D. L. (2008). Rapid detection of picloram in agricultural field samples using a disposable immunomembrane-based electrochemical sensor. *Environmental Science and Technology*, 42(4), 1207–1212. <https://doi.org/10.1021/es7024593>
- Torres, D., & Seijo, B. (2009). Nanosistemas Lipídicos. *Nanotecnología Farmacéutica, Realidades y Posibilidades Farmacoterapéuticas*, 133–167.
- Tu, Q., Yang, T., Qu, Y., Gao, S., Zhang, Z., Zhang, Q., Wang, Y., Wang, J., & He, L. (2019). In situ colorimetric detection of glyphosate on plant tissues using cysteamine-modified gold nanoparticles. *Analyst*, 144(6), 2017–2025. <https://doi.org/10.1039/c8an02473a>
- Walia, S., & Acharya, A. (2014). Fluorescent cadmium sulfide nanoparticles for selective and sensitive detection of toxic pesticides in aqueous medium. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(12). <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2778-3>
- WWAP, U. N. W. W. A. P. (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water For A Sustainable World - UNESCO Digital Library*. In Unesco.
- Zhao, W., Brook, M. A., & Li, Y. (2008). Design of gold nanoparticle-based colorimetric biosensing assays. *ChemBioChem*, 9(15), 2363–2371. <https://doi.org/10.1002/cbic.200800282>