

**AVANCES DE LAS NANOTECNOLOGÍAS COMO PARTE DE UNA NUEVA  
PLATAFORMA TECNOLÓGICA CON CAPACIDAD PARA MEJORAR LOS  
MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**DANNY ROBERTSON LUNA PEÑALOZA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA, mes día de año**

**AVANCES DE LAS NANOTECNOLOGÍAS COMO PARTE DE UNA NUEVA  
PLATAFORMA TECNOLÓGICA CON CAPACIDAD PARA MEJORAR LOS  
MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**DANNY ROBERTSON LUNA PEÑALOZA**

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERA QUÍMICA**

**Directora: PhD(C). JENIFFER KATERINE CARRILLO GÓMEZ**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
Pamplona, junio 12 de 2021**

## **DEDICATORIA**

He concluido esta monografía con gran dedicación, por lo tanto, quiero dedicarlo y a mis padres por su apoyo para alcanzar los objetivos propuestos y formarme como un profesional.

**Danny Robertson**

## **AGRADECIMIENTOS**

Estoy agradecido con Dios porque me ha dado la capacidad, el conocimiento y la disciplina para realizar este trabajo.

A mis padres y mi familia por animarme a continuar con mis estudios, por enseñarme a vivir bajo normas morales, dándome directrices prácticas para la vida.

Las cosas que he logrado y los conocimientos adquiridos han sido fruto del apoyo de los docentes de la Universidad de Pamplona reflejado en esta monografía.

**Danny Robertson**

## GLOSARIO

### ➤ A

**ARD:** Aguas Residuales domésticas

**ADN:** Ácido desoxi Ribonucleico

**ARU:** Aguas Residuales Municipales o Urbanas

**ARI:** Aguas Residuales Industriales

**AQUAE:** Fundación del agua

**AQUASTAT:** Sistema mundial de información sobre el agua y la agricultura

**ADSORCIÓN:** Proceso en la cual átomos o moléculas de una sustancia son retenidas en la superficie de otra sustancia.

**Analito:** Son especies químicas cuya presencia o concentración se desea conocer.

### ➤ B

**Biorremediación:** Proceso que involucra el uso de microorganismos (bacterias y hongos), enzimas o plantas para mitigar el daño causado por la contaminación.

### ➤ C

**CNM:** Nanomateriales de carbono

**CNT:** Nanotubos de carbono

**Cd:** Cadmio

**Cr:** Cromo

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**CAR:** Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) son entes, encargados por ley de administrar el medio ambiente.

### ➤ D

**DBO:** Demanda Biológica de Oxígeno

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

➤ **E**

**ETH:** Escuela Politécnica Federal de Zúrich

**E.D.A.R.:** Estación depuradora de aguas residuales. Plantas dedicadas a la depuración de aguas residuales para reducir la contaminación.

➤

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / C:** Óxido de hierro III

**Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:** Óxido de hierro IV

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura

**FeCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:** La ferrita de cobalto es una ferrita semidura

➤ **G**

**g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:** Nitruro de carbono grafítico

➤ **H**

**Hg:** Mercurio

**Hibridación sp<sup>2</sup>:** Combinación de un orbital s y dos orbitales p, para formar 3 orbitales híbridos, que se disponen en un plano formando ángulos de 120°.

➤ **I**

➤ **J**

➤ **K**

➤ **M**

**MOF:** Estructuras metal orgánicas

**MXenes:** Compuestos inorgánicos. Los llamados MXenes, nanopartículas Ti<sub>3</sub> C<sub>2</sub> Tx forman una red bidimensional, similar al grafeno.

➤ **N**

**NMs:** Nanomateriales. Los nanomateriales poseen al menos una dimensión menor a los 100 nanómetros.

**nm:** Nanómetro.

**NPs:** Nanopartículas. Término para referenciar partículas con dos dimensiones menores a 100 nanómetros.

**NTCPM:** Nanotubos de carbono de pared múltiple

**NTCPM:** Nanotubos de carbono de pared sencilla

**nZVI:** Hierro nanoscópico nulivalente

**nAg:** Nanopartículas de plata

**nC60:** Fullerenos acuosos

**Ni:** Níquel

➤ **O**

**OG:** Óxido de grafeno.

**OGR:** Óxido de grafeno reducido.

**OMGs:** Organismos genéticamente modificados.

**Ósmosis Inversa:** Tipo de tratamiento físico-químico que sirve para eliminar impurezas del agua, haciéndola pasar a través de unas membranas semipermeables. Atrapa las partículas al hacerlas pasar por una serie de mallas o membranas concéntricas de diferentes tamaños.

➤ **P**

**Pb:** Plomo

**pH:** Medida determinar la alcalinidad o acidez de una disolución

**Poliacrilonitrilo (PAN):** Polímero utilizado en la fabricación de fibras sintéticas.

**Polímeros dendríticos.** Es una nueva clase de macromoléculas estructuralmente controladas que representan la cuarta clase de arquitecturas poliméricas

**PTAR:** Planta de tratamiento de Agua residuales.

➤ **Q**

➤ **R**

➤ **S**

**SAMMS:** self-assembled monolayers on mesoporous supports

**SST:** sólidos suspendidos totales

**Surfactante:** Elemento que actúa como detergente, emulsionante o humectante y que permite reducir la tensión superficial que existe en un fluido. Por lo general se trata de sustancias que ejercen influencia en la zona de contacto que se crea entre dos fases.

➤ **T**

**TiO<sub>2</sub>**: óxido de titanio IV

➤ **W**

➤ **X**

**XPS**: Análisis de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X

➤ **Z**

**Zn**: Zinc

**Zr**: Circonio

**Zeolitas**:

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	17
3. OBJETIVOS.....	19
3.1    Objetivo general .....	19
3.2    Objetivos específicos.....	19
4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	20
4.1    ¿Qué es la nanotecnología? .....	20
4.2    Historia de la nanotecnología.....	21
4.3    ¿Para qué sirve la nanotecnología? .....	22
4.4    Áreas de Aplicación de la Nanotecnología .....	22
4.4.1    Industria textil: .....	22
4.4.2    Diseño agrícola: .....	22
4.4.3    Apoyo a la ganadería: .....	23
4.4.4    Industria alimenticia: .....	23
4.4.5    Nanofármacos: .....	23
4.4.6    Nanoinformática: .....	23
4.4.7    Nanotermología: .....	23
4.4.8    Nanoenergías: .....	23
4.5    Ejemplos de Nanotecnología.....	24
4.5.1    Silicio negro bactericida: .....	24
4.5.2    Nanocirugía mediante un robot.....	24
4.5.3    Nanotecnología en medicina.....	24
4.5.3.1    Nanotratamientos para enfermedades incurables. ....	24
4.5.3.2    Enlentecimiento nanotecnológico del envejecimiento. ....	24
4.5.3.3    Nanovacunas.....	24
4.5.3.4    Reprogramación genética. ....	24

4.6	Nanotecnología y biotecnología.....	25
5.	AGUAS RESIDUALES .....	26
5.1	CLASIFICACIÓN AGUAS RESIDUALES .....	27
5.1.1	Aguas Residuales domésticas (ARD):.....	27
5.1.2	Aguas Residuales Municipales o Urbanas (ARU):.....	27
5.1.3	Aguas Residuales Industriales (ARI):.....	27
5.1.4	Aguas Negras:.....	27
5.1.5	Aguas Grises:.....	27
5.2	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	27
5.2.1	Tratamiento preliminar .....	28
5.2.2	Tratamiento primario .....	28
5.2.3	Tratamiento secundario.....	28
5.2.4	Tratamiento terciario.....	29
5.3	CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	30
6.	La Nanotecnología para el Tratamiento de las Aguas.....	32
6.1	Nanomateriales como adsorbentes.....	32
6.2	Uso de membranas con nanomateriales .....	34
6.3	Nanomateriales para catálisis y fotocátalisis.....	35
6.4	Uso de nanomateriales como sensores de la calidad del agua .....	37
6.5	Mapa mental de aplicaciones de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.	38
7.	BENEFICIOS DE LOS NANOMATERIALES EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS .....	38
7.1	Remoción de trazas orgánicas y contaminantes de interés reciente:.....	38
7.2	Remoción de metales: .....	39
7.3	Oxidación y reducción de contaminantes: .....	39
7.4	Inactivación y eliminación de virus y bacterias. ....	39
7.5	Nano sensores.....	39

7.6	Simplificación: .....	39
7.7	Reducción de costos. ....	39
7.8	Incremento de la efectividad. ....	40
8.	NANOPARTÍCULAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA.....	40
8.1	Metal y sus óxidos.....	40
8.2	Nanomateriales de carbono (CNM) .....	42
8.2.1	Nanomateriales basados en grafeno.....	43
8.2.1.1	Materiales en base a grafeno para el tratamiento del agua.....	43
8.2.2	Nanotubos de carbono.....	44
8.2.2.1	Tipos de nanotubos de carbono NTCPS y NTCPM.....	45
8.2.3	Nitruro de carbono grafitico (g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ).....	46
8.3	Estructuras metalorgánicas (MOF) .....	47
8.4	Hierro novalente cero .....	49
9.	FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN.....	50
10.	NANOPARTÍCULAS DEL SISTEMA AL MEDIO AMBIENTE .....	50
11.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	51
11.1	CONSIDERACIONES FINALES .....	52
11.2	INCERTIDUMBRES DE LA NANOTECNOLOGÍA:.....	53
12.	CONCLUSIONES .....	54
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	55

## **LISTA DE TABLAS**

**Tabla 1. Contaminantes de aguas residuales**

**Tabla 2. Lista de nanopartículas y los contaminantes que eliminan en el tratamiento del agua.**

**Cuadro 1. Etapas del proceso de tratamientos de depuración de aguas residuales y sistemas usados**

**Mapa mental** nos muestra las diversas utilidades de la nanotecnología para el tratamiento de algunos contaminantes de las aguas residuales y los diferentes nanomateriales que se utilizan

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escala nanométrica (En la escala nanométrica, 2010) .....	21
Figura 2. Principales aplicaciones de la nanotecnología (Ávalos, 2013) .....	23
Figura 3. Destino de las extracciones de agua dulce: Consumo global y producción de aguas residuales por los principales sectores. Fuente: (FAO, 2016) .....	26
Figura 4. Planta de Tratamiento para Aguas n (PTAR) que ayudan a minimizar dicha problemática. Visión general de la planta de tratamiento de Antwerpwn-Zuid situado al sur de Amberes (Bélgica). .....	28
Figura 5. Etapas de la línea de aguas. Fuente: Alianza por el agua.....	29
Figura 6. Representación esquemática de SAMMS (monocapas autoensambladas sobre soportes mesoporosos).....	33
Figura 7. Visión general de las subclases de polímeros dendríticos. Sus características geométricas dependen de la direccionalidad del núcleo inicial del crecimiento, número y longitud de ramificaciones, y pueden ser clasificados dependiendo de la di (URA, 2011) ....	34
Figura 8. Membranas de nanofiltración con diferentes tamaños de los microporos. ....	35
Figura 9. La fotocatalisis y sus componentes. Fuente: (Efe, 2017).....	36
Figura 10. Ilustración de la estructura genérica de un sensor químico .....	37
Figura 11. Los catalizadores desarrollados son capaces de convertir el antibiótico norfloxacin en sustancias minerales en presencia de luz y agua oxigenada .....	42
Figura 12. Motores de óxido de grafeno a la micro escala, que son capaces de absorber el plomo de las aguas residuales industriales a partir de un nivel de 1.000 partes por mil millones hasta por debajo de 50 partes por mil millones en tan sólo una hora.....	44
Figura 13. Estructura de nanotubos pared sencilla (NTCPS) y múltiple (NTCPM) <sup>4</sup> .....	45
Figura 14. Ilustración esquemática del proceso de síntesis de los posibles precursores de gC <sub>3</sub> N <sub>4</sub> . Reproducido con permiso de Ong, WJ; Tan, LL; Ng, YH; Yong, ST; Chai, SP Fotocatalizadores basados en nitruro de carbono grafítico (gC <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) para la foto .....	46
Figura 15. Cristales individuales miden desde 10s micrones hasta ~ 100 nm en tamaños laterales en forma de capas. Este producto está muy cristalizado. Los productos amorfos se han filtrado y separado mediante procesos de centrifugación. ....	47
Figura 16. Elementos básicos de conformación de un material MOF y los clústeres metálicos y ligandos orgánicos más utilizados. Fuente: (Amayuelas, 2018).....	48
Figura 17. Los MXenes son materiales 2D que forman partículas de varias capas.....	48

Figura 18. El modelo de núcleo-capa de nanopartículas de hierro de valencia cero. El núcleo se compone principalmente de hierro de valencia cero y proporciona el poder reductor para reacciones con contaminantes ambientales.....50

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los problemas ambientales del mundo, la escasez del agua es uno de los más importantes. Las sequías prolongadas, los protocolos sanitarios, la explosión demográfica, demandas desafiantes de varios usuarios, puede ser la causa de la disminución de este recurso del agua (Yanyang Zhang, 2016). Por lo tanto, en los próximos años, el agua limpia tendrá una gran demanda y puede ser un bien escaso y costoso. Se espera que para el 2025, el mundo estará bajo estrés hídrico (FAO, 2015). Hoy en la mayoría de los países en desarrollo, los efluentes se vierten en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado. Por lo tanto, puede llegar a estar tan contaminada por las actividades humanas, que ya no sea útil, sino más bien nociva. Esto ha llevado a la formación de las aguas residuales que aparecen sucias y contaminadas. Los contaminantes de las aguas residuales incluyen contaminantes orgánicos refractarios, contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados y muchos compuestos complejos (B.D. Desphande, 2019). Existen técnicas comerciales y no comerciales para tratar las aguas residuales de diferentes formas. Implica principalmente procesos primarios, secundarios y terciarios y pueden ser físicos, biológicos, químicos, físico-químicos.

Aunque los métodos de desinfección de agua, descontaminación y desalinización puedan mitigar algunos de estos problemas, estos métodos de tratamiento son generalmente químicos y energéticamente intensivos, por lo que se requiere de fuertes inversiones y expertos en ingeniería. Por lo tanto, es necesario desarrollar tecnología innovadora, de alta efectividad y de bajo presupuesto para el tratamiento de aguas residuales. Los métodos convencionales junto con las nuevas tecnologías rápidas mejoran la velocidad de reacción y son significativos, como la biorremediación, la adsorción y la oxidación fotocatalítica útiles para superar los problemas de contaminación del agua. (Morató & Peñuela, 2018). Recientemente los nanomateriales (NM) por sus propiedades han mostrado ser respetuosos con el medio ambiente para tratar los problemas del agua contaminada, por la eficiencia del procesamiento, mejorando la reactividad, el área de superficie, el beneficio económico y el consumo de energía. En este contexto, la nanotecnología es la extensión de nuevas tecnologías de tratamiento de agua que es urgentemente necesario para poder satisfacer los requerimientos de calidad de agua para su re-uso y para asegurar la protección del medio ambiente (Chávez Lizárraga, 2018).

El objetivo del trabajo monográfico es ofrecer una mirada a los avances de la nanotecnología como parte de una nueva plataforma tecnológica con capacidad para mejorar los métodos de tratamiento de aguas residuales.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La población mundial que está demandando alimentos es de 6,768 millones y de acuerdo con proyecciones de estadísticas la población continuará creciendo hasta el 2050. Datos que muestran la prioridad del suministro del agua, con calidad adecuada y cantidad suficiente. Ya logrado este objetivo, surge otro no menos importante que consiste en la adecuada eliminación de las aguas ya utilizadas que se convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades y trastorno del medioambiente.

En las últimas décadas el mundo ha venido mostrando preocupación y está tratando de resolver los problemas relacionados con la disposición de los efluentes líquidos provenientes de las aguas residuales, es decir después de haber sido utilizadas. La falta de plantas de tratamiento para las aguas residuales en las ciudades, en las industrias, hoteles, explotaciones mineras, agrícolas y ganaderas, ocasiona grandes desechos de aguas contaminadas que hacen mucho daño al medio ambiente. La mayoría de esas aguas es descargada en los ríos, lagos, mares, en los suelos a cielo abierto o en el subsuelo, a través de los llamados pozos sépticos y rellenos sanitarios (Rodríguez Pimentel, 2017).

La contaminación del agua por residuos sólidos y vertimientos relacionados con la actividad minera de Metales pesados como el Arsénico, Cobalto, Cobre, Cadmio, Plomo, Mercurio, Plata y Zinc; contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, cuando entran en contacto con el agua, generan contaminación de las fuentes hídricas por drenaje ácido, por contaminación química, por erosión, sedimentación y lixiviación.

La contaminación química cuando agentes químicos como el cianuro y el ácido sulfúrico, usados por las mineras para la separación del material deseado del material en bruto se derraman, gotean o se trasladan a un cuerpo de agua cercano son altamente tóxicos para los humanos y los animales contaminando las aguas subterráneas con metales pesados y pueden volverse letales para muchas comunidades (Revilla Calcina, 2018).

De toda el agua consumida en el mundo, el 67% se utiliza para la agricultura. La utilización de pesticidas para el control de las plagas, fertilizantes y diversas sustancias químicas altamente contaminantes se emplean en esta actividad. Se requiere, por lo tanto, realizar procesos de desalinización del agua, debido a los nitratos y sulfatos resultantes de los procesos de la agricultura. Esto pone en riesgo a unos 28 millones de agricultores, lo que pueden ocasionar efectos en la salud con la adquisición de enfermedades respiratorias, cáncer, desórdenes

neurológicos, entre otros. Además, problemas ambientales debido a los métodos agroquímicos convencionales para el control de insectos y plagas.

Las fuentes de agua (ríos, acuíferos, lagos, mar), han sido incapaces por sí mismas para absorber y neutralizar esta carga contaminante, y por ello estas masas de agua han perdido sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada, que responda al equilibrio ecológico que de ellas se espera para preservar los cuerpos de agua. Como resultado, pierden aquellas condiciones mínimas que les son exigidas para su racional y adecuado aprovechamiento como fuentes de abastecimiento de agua, como vías de transporte o fuentes de energía (Rodríguez Pimentel, 2017).

Las aguas de desecho dispuestas en una corriente superficial (lagos, ríos, mar) sin ningún tratamiento, ocasionan graves inconvenientes de contaminación que afectan la flora y la fauna. Estas aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause los problemas antes mencionados. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas residuales deberá responder a las condiciones que acusen los receptores en los cuales se haya producido su vertimiento.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser diseñadas, construidas y operadas con el objetivo de convertir el líquido cloacal proveniente del uso de las aguas de abastecimiento, en un efluente final aceptable, y para disponer adecuadamente de los sólidos ofensivos que necesariamente son separados durante el proceso. Esto obliga a satisfacer ciertas normas o reglas capaces de garantizar la preservación de las aguas tratadas al límite de que su uso posterior no sea descartado (Rodríguez Pimentel, 2017).

La nanotecnología es la potencial solución para la previsión de agua en el largo término con técnicas como la filtración, el empleo de nanopartículas en catálisis y la desalinización. Más aún, con el desarrollo de la nanotecnología, se pueden potenciar técnicas convencionales usadas en el tratamiento de aguas como la adsorción, floculación y coagulación (Feng & Astruc, 2018). La nanotecnología ha sido eficiente para remediación de aguas subterráneas, en biorremediación, remoción de tintas y en procesos de filtración (Raffino M. , 2020). Por lo tanto, la nanotecnología es efectiva en tratar problemas relacionados con agua, ya que el uso de nanomateriales favorece al desarrollo de tratamientos más eficientes y avanzados en agua (Tyagi, Rawtani, Khatri, & Tharmavaram, 2018).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar los avances de las nanotecnologías como parte de una nueva plataforma tecnológica con capacidad para mejorar los métodos de tratamiento de aguas

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los conceptos básicos de nanotecnología, importancia y aplicaciones en todos los campos de la ciencia.
- Diseñar un mapa mental de aplicaciones de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales.
- Recopilar y organizar la información de diversas bases de datos bibliográficos para mostrar la nanotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales.

## 4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 4.1 ¿QUÉ ES LA NANOTECNOLOGÍA?

A grandes rasgos, la nanotecnología es la manipulación y manufactura de materiales y artefactos a una escala atómica o molecular, es decir, nanométrica. Se trata de un campo muy amplio de investigaciones y aplicaciones todavía en consolidación. La nanotecnología involucra la materia subatómica, así como los saberes específicos de disciplinas científicas como la química orgánica, la biología molecular, los semiconductores, la micro fabricación y la ciencia de las superficies, entre otras (Manzanas, 2019).

Dicho de manera muy simple, la nanotecnología parte de la idea de construir máquinas microscópicas y a su vez producir materiales novedosos, de una configuración molecular única y particular. Sin embargo, la naturaleza de muchas de dichas “máquinas” no es semejante a las que empleamos en nuestro día a día, sino que bien pueden consistir en virus “reprogramados” genéticamente y otros medios biotecnológicos. En consecuencia, esta tecnología es una fuente infinita de posibilidades y, naturalmente, de peligros.

Además, a través de la nanotecnología se han construido nanomateriales, que son elementos inexistentes en la naturaleza y de propiedades asombrosas. Fueron creados a partir de la modificación de las moléculas de los materiales ya existentes.

Así, se ha abierto un gigantesco campo de investigación con aplicaciones virtualmente infinitas, que se encuentran aún bajo definición y experimentación. La nanotecnología promete traer consigo una nueva revolución industrial y científico-tecnológica.

# El Nano

- Se define al "NANO" como la milésima parte de un millón, es decir un nanómetro representa la milmillonésima parte de un metro o lo que es lo mismo decir la millonésima parte de un milímetro.

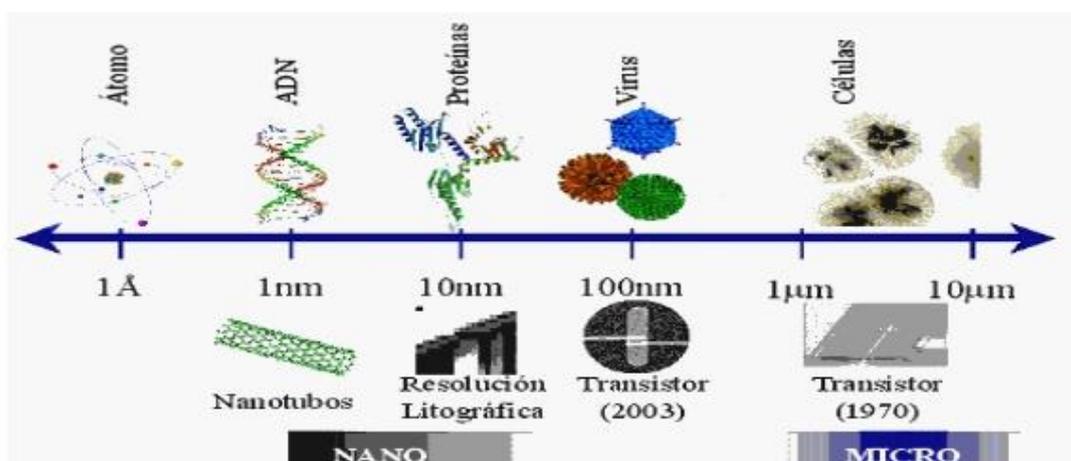


Figura 1. Escala nanométrica (En la escala nométrica, 2010)

## 4.2 HISTORIA DE LA NANOTECNOLOGÍA

En 1959 se habló por primera vez de la posibilidad de la nanotecnología y la nanociencia. El primero en hacer referencia a ellas fue un Premio Nobel de Física (1965), el estadounidense Richard Feynman (1918-1988), durante su discurso en Caltech (California, EEUU), en el que teorizó sobre la síntesis por manipulación directa de los átomos.

Sin embargo, el término “nanotecnología” fue acuñado en 1974 por el japonés Norio Taniguchi (1912-1999). Desde entonces, muchos han sido los que han soñado o han teorizado con la posibilidad de este tipo de máquinas y materiales de avanzada.

El ingeniero estadounidense Kim Eric Drexler (1955) participó en la popularización del término y de este tipo de investigaciones, siendo en gran parte responsable del inicio formal del campo de estudio de la nanotecnología en la década de 1980. Ello, además, responde a los adelantos de la época en microscopía y al descubrimiento de los fullerenos en 1985.

A partir del año 2000 los nanomateriales comenzaron a emplearse industrialmente. En respuesta los gobiernos del mundo comenzaron a invertir enormes sumas en la investigación y desarrollo de la nanotecnología.

Sus aplicaciones al campo de la bioquímica, medicina e ingeniería genética se hicieron patentes poco después. Hoy en día se trata de uno de los campos científicos de mayor vigencia y demanda incluso en países del llamado Tercer Mundo. (Raffino M. , 2020)

### **4.3 ¿PARA QUÉ SIRVE LA NANOTECNOLOGÍA?**

En términos básicos, la nanotecnología es un tipo de ingeniería de materiales a escala atómica o molecular. Eso significa que permite manipular la materia a una escala infinitamente pequeña, de entre 1 y 100 nanómetros, es decir, más o menos entre el tamaño de una molécula de ADN (2 nm) y una bacteria del género *Mycoplasma* (200 nm).

Por lo tanto, las utilidades de la nanotecnología son virtualmente infinitas: desde intervenir la composición química de los seres vivos, permitiendo así modificar el ADN de seres vivos microscópicos y “programarlos” para llevar a cabo ciertas tareas bioquímicas, hasta la manufactura de materiales novedosos y de propiedades únicas, llamados nanomateriales.

(Raffino M. e., 2020)

### **4.4 ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA**

Algunas de las aplicaciones actuales de la nanotecnología tienen que ver con:

#### **4.4.1 Industria textil**

La creación de tejidos inteligentes, capaces de comportamientos pre-programados en chips u otros instrumentos electrónicos, pudiendo así ser autolimpiantes, repelentes de manchas o pudiendo cambiar de coloración y de temperatura.

#### **4.4.2 Diseño agrícola**

Elaboración de plaguicidas, pesticidas y fertilizantes de bioquímica controlada que permitan el mejoramiento de los suelos, así como de nanosensores para detección de aguas subterráneas, concentración de nutrientes, etc.

#### 4.4.3 Apoyo a la ganadería

Fabricación a través de nanopartículas de vacunas y fármacos para cuidar la salud del ganado, o nanosensores capaces de alertar sobre la presencia de enfermedades, parásitos, etc.

#### 4.4.4 Industria alimenticia

En esta área se desarrollan desde sensores alimenticios, o sea, elementos que puedan comprobar la viabilidad de los alimentos, hasta nanoenvases para ella, diseñados especialmente para retardar el proceso natural de descomposición de la comida.

#### 4.4.5 Nanofármacos

Se trata de una primera generación de productos farmacológicos diseñados con nanosistemas, capaces de distribuir de manera eficiente y específica los compuestos activos de las medicinas, obteniendo mejores y más rápidos resultados y minimizando los daños colaterales.

Por otro lado, la industria vislumbra como campos futuros de investigación los siguientes:

#### 4.4.6 Nanoinformática

El diseño de sistemas computarizados de enorme potencia y rapidez a través de nanosistemas.

#### 4.4.7 Nanotermología

Aplicación de nanomáquinas para regular de manera eficiente y rápida la temperatura local.

#### 4.4.8 Nanoenergías

Energías eficientes, seguras y de bajo impacto ambiental, como una solución a la crisis energética con que inicia el siglo XXI. (Raffino M. e., 2020)

Soluciones ambientales, como sistemas nanotecnológicos de eliminación de residuos peligrosos o de eliminación de basura.



Figura 2. Principales aplicaciones de la nanotecnología (Ávalos, 2013)

## **4.5 EJEMPLOS DE NANOTECNOLOGÍA**

Un par de ejemplos de la aplicación nanotecnológica actual a problemas humanos son los siguientes:

### **4.5.1 Silicio negro bactericida**

Científicos australianos y españoles anunciaron la creación de un material conocido como “silicio negro”, cuya composición molecular impide, sin necesidad de productos añadidos, la proliferación de numerosas especies de bacterias grampositivas y gramnegativas, además de disminuir la efectividad de ciertos tipos de endosporas.

### **4.5.2 Nanocirugía mediante un robot**

El laboratorio suizo ETH Zürich se preparan para probar su primer microrobot guiado magnéticamente, conocido como OctoMag, con el cual se espera poder llevar a cabo microcirugías sin abrir al paciente, simplemente inyectándolo dentro del cuerpo mediante una pequeña aguja. También en EEUU se han probado modelos semejantes de micro bombas, que liberan fármacos en el ojo cuando es necesario.

### **4.5.3 Nanotecnología en medicina**

Las nanovacunas pueden ayudar al sistema inmunológico a luchar contra enfermedades.

Las promesas de la nanotecnología para el adelanto de la medicina son, cuando menos, asombrosas. Aún resta mucho por descubrir, como:

#### **4.5.3.1 Nanotratamientos para enfermedades incurables**

Soluciones nanotecnológicas al cáncer, al VIH/SIDA o al mal de Alzheimer podrían llegar de la mano de robots bioquímicos inyectados en el cuerpo humano.

#### **4.5.3.2 Enlentecimiento nanotecnológico del envejecimiento**

Algún día podríamos, mediante nanopartículas, combatir el envejecimiento a un nivel molecular y alargar todavía más nuestras expectativas de vida útil, retrasando la senilidad.

#### **4.5.3.3 Nanovacunas**

Sistemas de protección ante enfermedades basados en la introducción de nanosistemas al organismo, los cuales se ocuparían de asistir al sistema inmunológico en la lucha contra todo tipo de nuevas enfermedades.

#### **4.5.3.4 Reprogramación genética**

Mediante nanorobots sería posible modificar nuestro ADN y eliminar de manera paulatina genes portadores de enfermedades congénitas, de deficiencias y otros males. (Navarro Ferrer,

2021) Así mejoraría la calidad de vida de la especie en general. Esto, claro, exige también repensar las leyes morales de la ciencia hasta cierto nivel.

#### **4.6 NANOTECNOLOGÍA Y BIOTECNOLOGÍA**

La biotecnología es la aplicación de soluciones tecnológicas a problemas de índole biológico. La misma adquiere todo un nuevo nivel gracias a la introducción de las nanociencias.

La posibilidad de programar o reprogramar seres vivos mediante la intervención nanotecnológica del ADN podría permitirnos conducir la vida hacia senderos más convenientes. Sin embargo, la combinación de biotecnología y nanotecnología implicará importantes riesgos éticos y biológicos.

La humanidad sabe de sobra lo que ocurre cuando intenta jugar a ser Dios. Por ejemplo, la producción de vacas más lecheras y con más carne, cultivos resistentes a las plagas y otras características deseables, deberá siempre ir de la mano con la reflexión sobre nuestro lugar en el orden natural del mundo.

Organismos genéticamente modificados (OMGs). El punto clave de estos organismos está en entender que hay muchas formas de modificar el material genético en función de aquello que se pretenda conseguir. Los usos de los OMGs son casi innumerables y están presentes en muchísimos ámbitos, pero destacan especialmente en la industria agroalimentaria, en la industria farmacéutica y en medicina.

En cuanto a la primera de ellas, la industria agroalimentaria, ésta práctica se realiza para crear cultivos resistentes a herbicidas y pesticidas, para aumentar la producción, para mejorar las características físicas de los alimentos, haciéndolos más apetecibles, o incluso para que aporten vitaminas.

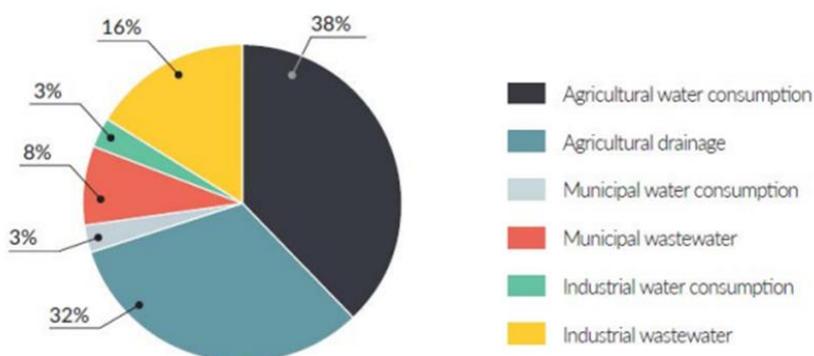
En el caso de la industria farmacéutica, las favoritas por excelencia son las bacterias modificadas genéticamente. Se utilizan como pequeñas biofábricas para la producción de diversas sustancias, entre las que destacan las proteínas humanas como insulina, hormona del crecimiento, factores de coagulación, etc. Además, los OMGs han permitido el desarrollo de nuevas vacunas y tratamientos, como es el caso de la terapia génica, que supuso una auténtica revolución (Chofre, 2020).

## 5. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellos tipos de agua que han sido tratadas de alguna manera por el ser humano y, en consecuencia, trae efectos negativos en los cuerpos de agua manipulados. (Chunling Luo, 2011). Estas aguas también conocidas como aguas negras o cloacales, generan un residuo el cual afecta al entorno de seres vivos que la rodea. Este tipo de aguas son controladas por el gobierno colombiano, según las leyes locales vigentes. Para Colombia, estos vertimientos se rigen por la Resolución 0631 de 2015, que controla las propiedades fisicoquímicas alteradas en los cuerpos de agua, estos aspectos pueden ir desde pH, alcalinidad, grasas y aceites, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), entre otros.

Según la Fundación «AQUA» globalmente, más del 80% de las aguas residuales vuelve a fluir hacia el ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas; 1.800 millones de personas utilizan una fuente de agua potable contaminada con heces, con el riesgo de contraer enfermedades como el cólera, disentería, fiebre tifoidea o poliomielitis. Esta es la causa de alrededor de 842.000 muertes cada año (AQUAE, 2017).

Según la base de datos de AQUASTAT de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO), se estima que los usos mundiales de agua dulce son aproximadamente 3.928 km<sup>3</sup> al año. Aproximadamente el 44% (1.716 km<sup>3</sup> cúbicos por año) de esta agua se consume principalmente en la agricultura y el 56% restante (2.212 km<sup>3</sup> cúbicos por año) es liberado al medio ambiente como aguas residuales en forma de efluentes municipales e industriales y agua de drenaje agrícola (FAO, 2016). Figura 3.



**Figura 3. Destino de las extracciones de agua dulce: Consumo global y producción de aguas residuales por los principales sectores.** Fuente: (FAO, 2016)

## **5.1 CLASIFICACIÓN AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales son clasificadas de la siguiente manera (Romero, 2018):

### **5.1.1 Aguas Residuales domésticas (ARD)**

Líquidos provenientes de viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales.

### **5.1.2 Aguas Residuales Municipales o Urbanas (ARU)**

Son residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal.

### **5.1.3 Aguas Residuales Industriales (ARI)**

Residuos líquidos provenientes de las descargas de industrias de manufactura.

### **5.1.4 Aguas Negras**

Residuos líquidos provenientes de inodoros, es decir, transportan excrementos humanos y orina.

### **5.1.5 Aguas Grises**

Residuos líquidos provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras. (Nuevo, Los procesos de depuración de aguas residuales, 2017)

.

## **5.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales contienen residuos procedentes de las ciudades y fábricas. Es necesario tratarlos en plantas de tratamiento Figura.4, antes de enterrarlos o devolverlos a los sistemas hídricos locales. En una depuradora, los residuos atraviesan una serie de cedazos, cámaras y procesos químicos para reducir su volumen y toxicidad.

Este tratamiento consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que eliminan los contaminantes del agua para que el ser humano pueda hacer uso de ella. El tratamiento de las aguas residuales es un proceso de varias etapas que incluye, las etapas preliminares, primarias, secundarias y terciarias (Generate express, 2021). Cuadro 1 y Figura 5.



**Figura 4.** Planta de Tratamiento para Aguas n (PTAR) que ayudan a minimizar dicha problemática. Visión general de la planta de tratamiento de Antwerpwn-Zuid situado al sur deAmberes (Bélgica).

### **5.2.1 Tratamiento preliminar**

El tratamiento preliminar consiste en la detección y eliminación de arenillas. Los sólidos flotantes, tales como palos, trapos, telas, arena. Las operaciones unitarias del tratamiento preliminar están diseñadas para eliminar sólidos grandes, suspendidos y flotantes. Este tratamiento comienza con pasar el agua a través de rejjas y rejillas, triturado y luego a través de separadores de arena.

### **5.2.2 Tratamiento primario**

El objetivo de este tratamiento es la eliminación por gravedad o asistida por sustancias químicas. Se le agregan compuestos químicos como aluminio, polielectrolitos floclantes y sales de hierro para completar el proceso. Además, se logra la precipitación del fósforo, los sólidos en estado coloide o en suspensión muy finos. Este proceso es desarrollado a través del uso de maquinaria hidráulica, por lo que se le conoce como tratamiento mecánico.

### **5.2.3 Tratamiento secundario**

Las aguas residuales clarificadas se someten a un tratamiento secundario, un proceso biológico que utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales. Estos microorganismos utilizan la materia orgánica como alimento y convierten los compuestos orgánicos complejos en complejos simples y fácilmente sedimentables. El proceso incluye lodos activados, zanjas de oxidación y reactores discontinuos secuenciales.

### 5.2.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario se emplea a menudo para mejorar la calidad de los efluentes. Los procesos típicos incluyen la eliminación de los nutrientes (fósforo y nitrógeno) y los métodos de desinfección con luz ultravioleta, el ozono o el cloro (TECPA, 2017).

PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO TERCIARIO
<b>Objetivo</b> Eliminación de objetos gruesos, arenas y grasas	<b>Objetivo</b> Eliminación de materia sedimentable y flotante	<b>Objetivo</b> Eliminación de materia orgánica disuelta o coloidal	<b>Objetivo</b> Eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica residual, nutrientes y patógenos
<b>Operaciones básicas</b> - Desbaste - Tamizado - Desarenado - Desengrasado	<b>Operaciones básicas</b> - Decantación primaria - Tratamientos físico-químicos (coagulación-floculación)	<b>Procesos básicos</b> - Degradación bacteriana - Decantación secundaria	<b>Procesos básicos</b> - Floculación - Filtración - Eliminación de N y P - Desinfección
<b>Procesos físicos</b>	<b>Procesos físicos y químicos</b>	<b>Procesos biológicos</b>	<b>Procesos físicos, químicos y biológicos</b>

Cuadro 1. Etapas del proceso de tratamientos de depuración de aguas residuales y sistemas usados

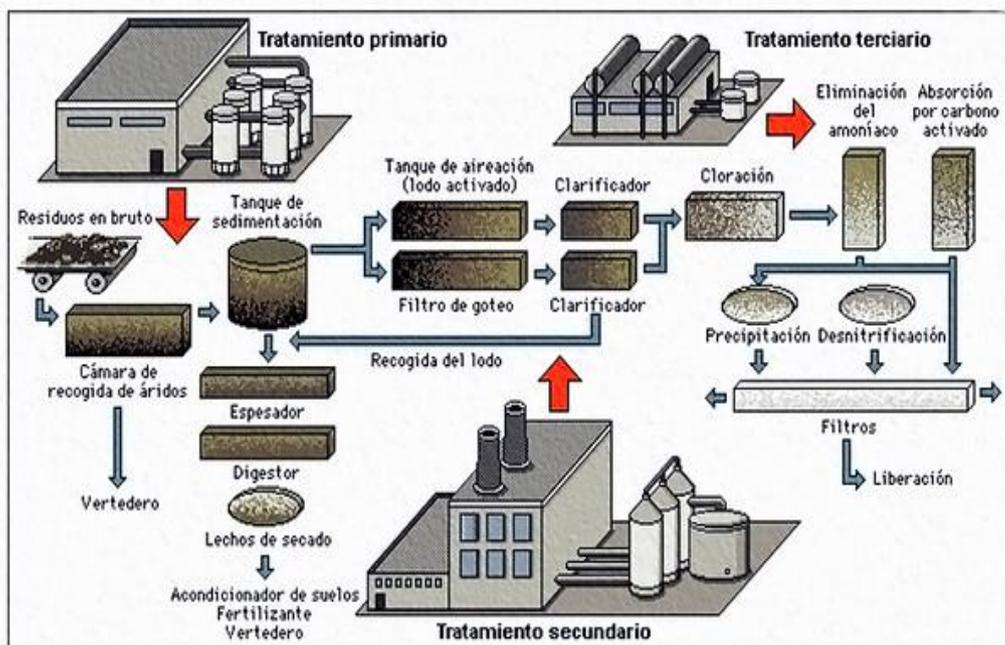


Figura 5. Etapas de la línea de aguas. Fuente: Alianza por el agua

### 5.3 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

El recurso hídrico en general, contiene concentraciones variables de sustancias dependiendo del tipo de agua que se analice, presentando diferentes características fisicoquímicas, que se tienen en cuenta para poder tener un manejo óptimo del recurso para posteriormente ser tratado. Si no se realiza un buen manejo del recurso se generaría una mala caracterización de las aguas e impide seleccionar correctamente los tratamientos que esta necesite.

Por su estado físico se pueden caracterizar y distinguir en las aguas residuales según su olor, color y temperatura, fracciones suspendidas, fracciones coloidales y fracciones solubles; para determinar la concentración de fracciones coloidales y fracciones suspendidas se emplea el ensayo de sólidos suspendidos totales (SST).

Las sustancias químicas dependen de los sólidos tanto en suspensión como en solución presentes en el agua, estos sólidos se pueden clasificar en dos grupos: inorgánicos y orgánicos. Los sólidos inorgánicos se conforman principalmente por Nitrógeno, Fósforo, Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos y trazas de sustancias tóxicas como Arsénico, Cianuro, Cadmio, Cromo, Cobre, Mercurio, Plomo y Zinc. Los sólidos orgánicos se clasifican en nitrogenados y no nitrogenados. Los sólidos nitrogenados se componen por proteínas, ureas, aminas y aminoácidos, y los sólidos no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones. La concentración de materiales orgánicos presentes en el agua se determina a través de los análisis de Demanda Biológica de Oxígeno transcurridos cinco días de reacción (DBO5), el cual mide el material orgánico carbonáceo, y el análisis de Demanda Biológica de Oxígeno transcurridos veinte días de reacción (DBO20) el cual mide material orgánico carbonáceo y nitrogenado (Raffo Lecca & Ruiz Lizama, 2014).

Las características bacteriológicas de las aguas residuales son la razón más importante para hacer el tratamiento de las mismas ya que el propósito del tratamiento de aguas residuales es la eliminación de los agentes patógenos de origen humano presentes en las excretas con el propósito de evitar la contaminación biológica cortando el ciclo epidemiológico de transmisión. Los agentes patógenos presentes en las aguas residuales y los cuales son el objetivo principal del tratamiento de las mismas son: coliformes totales, coliformes fecales, salmonella, Escherichia coli (*E-Coli*), materia en suspensión y materia disuelta. La materia en suspensión puede ser separada por tratamientos fisicoquímicos, como la sedimentación y filtración, la materia suspendida sólida se trata con métodos de separación sólido-líquido por

gravedad o medios filtrantes y la materia suspendida aceitosa se trata mediante el método de separación Líquido-Líquido, normalmente por flotación (Fibras y normas de Colombia, 2018).

**Tabla 1. Contaminantes de aguas residuales**

<b>Sólidos en suspensión</b>	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al inicio del desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
<b>Materia orgánica Biodegradable</b>	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales. La materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
<b>Patógenos</b>	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
<b>Nutrientes</b>	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
<b>Contaminantes prioritarios</b>	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
<b>Materia orgánica refractaria</b>	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
<b>Metales pesados</b>	Los metales pesados, son, frecuentemente añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se quiere reutilizar el agua residual.
<b>Sólidos inorgánicos disueltos</b>	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

## **6. LA NANOTECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS**

La filtración en arena y la cloración han puesto fin a la mayoría de las epidemias transmitidas por el agua en los países desarrollados. A pesar de su eficacia, su uso no siempre da como resultados aguas totalmente potables. Por una parte, las aguas filtradas a través de arena pueden todavía contener materiales perjudiciales como sedimentos, microorganismos, iones metálicos y compuestos orgánicos disueltos. Por otra parte, la cloración puede dar lugar a la formación de subproductos nocivos como las cloraminas. Estos resultados ponen de manifiesto que la purificación de agua es un campo donde la investigación y la innovación en la búsqueda de nuevos métodos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente es posible y necesaria (Iriarte Mendivil, 2020).

Durante los últimos años, la nanotecnología se ha convertido en una alternativa prometedora para mejorar el tratamiento de aguas. La nanotecnología ha sido eficiente usada en el pasado para remediación de aguas subterráneas, en biorremediación, remoción de tintas y en procesos de filtración (Tyagi, Rawtani, Khatri, & Tharmavaram, 2018).

En este sentido, son varios los estudios que demuestran que la nanotecnología, y en concreto, los nanomateriales (Delgado, Romero Arellano, Guzmán González, & Sulbarán Rangel, 2018) (materiales con propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro en al menos una dimensión), pueden ayudar a resolver los inconvenientes con los que se encuentran los sistemas actuales de tratamiento de las aguas: potabilización, desalinización, desinfección, depuración, etc. Estos estudios se centran, de manera general, en (Suárez, 2016) :

- Uso de nanomateriales como adsorbentes
- Uso de membranas con nanomateriales
- Uso de nanopartículas catalíticas para fotocátalisis
- Uso de nanomateriales como sensores de la calidad del agua

### **6.1 NANOMATERIALES COMO ADSORBENTES**

Las nanotecnologías aplicadas para el tratamiento de materiales contaminados con sustancias peligrosas se pueden clasificar en adsorbentes y reactivas. Las nanotecnologías adsorbentes se basan en la alta superficie específica de los nanomateriales que se utilizan, la cual les confiere muy buenas propiedades adsorbentes.

Dentro de las nanotecnologías adsorbentes se utilizan principalmente nanomateriales de dos tipos, los SAMMS “self-aseembled monolayers on mesoporous supports” que son materiales nanoestructurados fabricados mediante autoensamblaje de una monocapa de surfactante en un soporte mesoporoso cerámico (figura 6) y los polímeros dendríticos que son materiales nanoestructurados que forman estructuras tridimensionales hiperramificadas a escala nanométrica. (figura 7) (URA. Agencia Vasca del agua, 2011). La ventaja de este tipo de materiales es la posibilidad de poder modificar su superficie con el objetivo de aumentar su actividad química específica. Pertenecen a este grupo las nanofibras de carbono activado. Los diferentes parámetros de fabricación de las nanofibras de carbono activado ha permitido obtener propiedades muy diferentes en las mismas. Valores como la relación O/C, el volumen de microporo o la superficie específica están directamente relacionados con el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias prioritarias y emergentes mediante tecnología innovadora basada en nanofibras como parámetros de fabricación. Debido a esto, se ha estudiado el efecto de estas propiedades en diferentes familias de contaminantes con objeto de poder establecer una metodología en la fabricación de nanofibras que permita optimizar el proceso de adsorción según la problemática planteada en cada caso (SOGAMA, 2018). Igualmente se ha profundizado en el propio proceso de fabricación de nanofibras de poliacrilonitrilo intentando aumentar la superficie específica en el material precursor para así obtener un aumento de dicha propiedad en la nanofibra final.

Un mecanismo para eliminar el cromo en aguas residuales a través de la adsorción es utilizando nanopartículas de hierro. Se mide el cromo total y se establece la cantidad de cromo adsorbido. Prueba que permite aplicar la nanotecnología para limpiar el medio ambiente

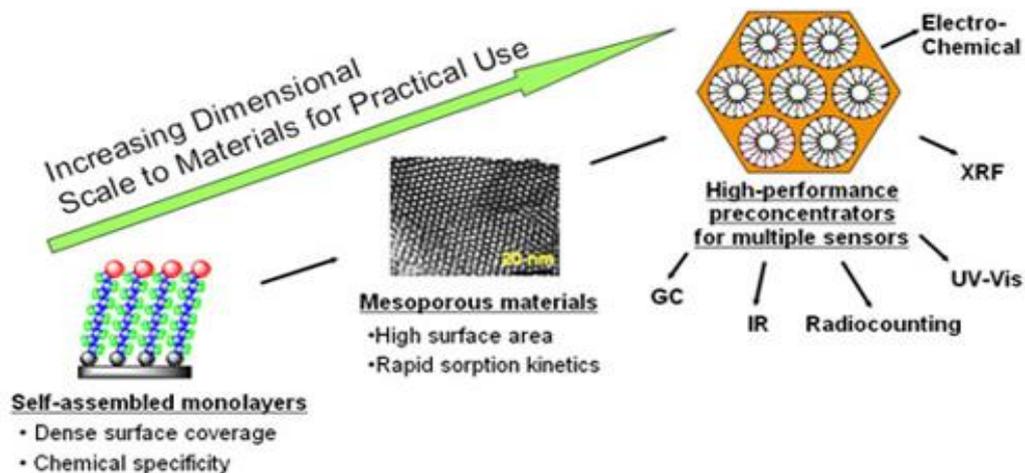


Figura 6. Representación esquemática de SAMMS (monocapas autoensambladas sobre soportes mesoporosos)

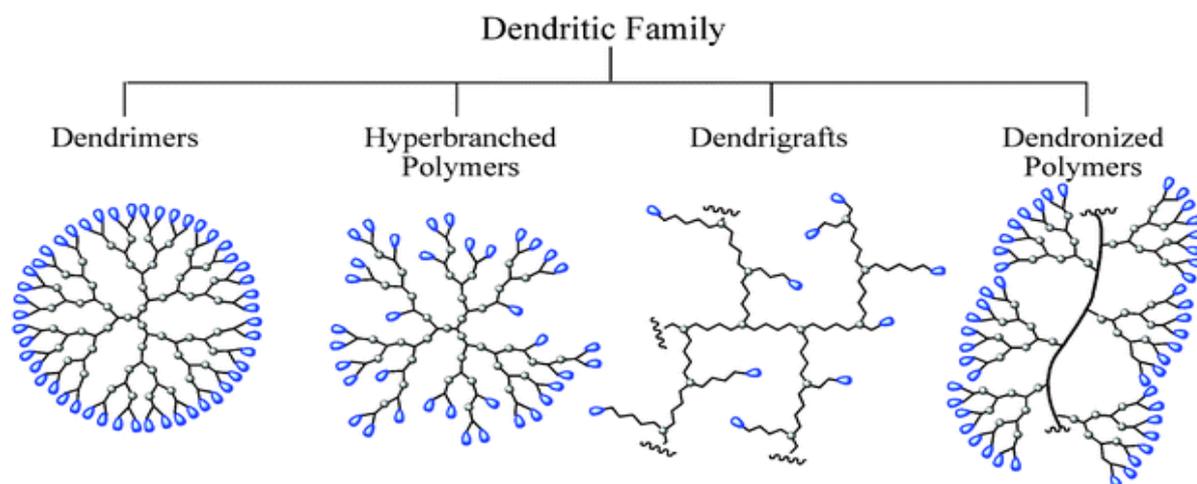


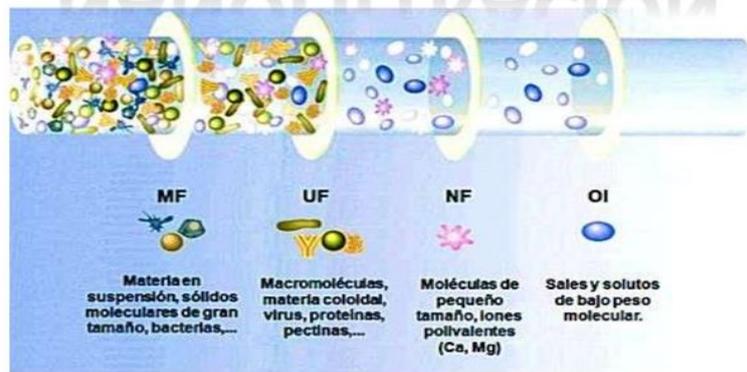
Figura 7. Visión general de las subclases de polímeros dentrícos. Sus características geométricas dependen de la direccionalidad del núcleo inicial del crecimiento, número y longitud de ramificaciones, y pueden ser clasificados dependiendo de la di (URA, 2011)

## 6.2 USO DE MEMBRANAS CON NANOMATERIALES

El uso de membranas de alta permeabilidad de nanocomposites como nano-zeolita y nano-TiO<sub>2</sub>; membranas anti-ensuciamiento utilizan nanotubos de carbono y nanopartículas de plata. La principal aplicación de los nanomateriales con una o varias dimensiones inferiores a 100 nm (como las nanofibras de carbono o el grafeno) es en la formación de materiales compuestos (Universidad de Alicante, s.f.), entre los que destacan los nanocomposites poliméricos. Estos materiales compuestos presentan mejores propiedades que el polímero original gracias a las características que aportan las nanocargas.

La nanofiltración es una técnica similar a la ósmosis inversa que se distingue de ella por el tipo de membrana que utiliza. Figura 8. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos.

# NANOFILTRACIÓN



La nanofiltración es una técnica similar a la ósmosis inversa que se distingue de ella por el tipo de membrana que utiliza. Las membranas de nanofiltración tienen un tamaño de poro equivalente de 0,001 – 0,0001 micras (O.I. < 0,0001  $\mu\text{m}$ ) con un corte molecular alrededor de 300 – 1.000 Dalton (O.I. 100 - 300 Dalton)

Fuente: AQUATRACTA S.L. - Consultoría e ingeniería del agua

Figura 8. Membranas de nanofiltración con diferentes tamaños de los microporos.

## 6.3 NANOMATERIALES PARA CATÁLISIS Y FOTOCATÁLISIS.

Los nanomateriales son más efectivos que catalizadores convencionales por dos razones: su tamaño extremadamente pequeño (entre 80-100 nm, con la consecuente mayor superficie de proporción área- volumen) y por la mayor reactividad relacionada a la nano escala en sí (Chaturvedy, 2012). El último aspecto (p.ej.: entender como la disminución del tamaño de las partículas catalíticas altera el rendimiento catalítico intrínseco más allá de simplemente tratarse de una expansión del área de superficie), y el diseño/preparación de los catalizadores con un tamaño y estructura más efectivos son objetivos de la investigación en catálisis.

La aplicación de procesos solares foto- catalíticos basados en nanomateriales desarrollados recientemente puede abrir oportunidades para el desarrollo de procesos integrados de bajo costo y logra alcanzar la alta calidad requerida para re-uso de agua de lluvia y agua de desecho. Un alto número de nanomateriales ha sido propuesto para aplicaciones fotocatalíticas, sin embargo limitaciones comunes han sido encontradas para los materiales o el proceso: a) Recombinación de cargas (con reducción consecuente de eficiencia de luz), b) Transparencia de luz visible (aunque un fuerte esfuerzo se ha concentrado en doping de catalizadores), c) Inestabilidad coloidal y derrame (ocurrencia potencial y extensión en matriz real es

mayormente desconocida), d) Recuperación de catalizador (en caso de reactores de lecho), e) Baja actividad, distribución de luz (en caso de catalizadores en soporte). Entre los catalizadores semiconductores, el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) ha recibido el mayor interés en tecnología de fotocatalisis. El  $\text{TiO}_2$  es altamente atractivo debido a su estabilidad química, alta fotoestabilidad, actividad fotocatalítica, no toxicidad y bajo costo (Chong, 2010). Aunque la fotocatalisis basada en  $\text{TiO}_2$  es ampliamente estudiada y la remoción exitosa de un amplio rango de moléculas orgánicas ha sido demostrada, su aplicación aún no ha alcanzado la mayor comercialización (Aurelia, 2018).

La aplicación de la fotocatalisis en aguas residuales ofrece las siguientes ventajas:

- Elimina todo tipo de contaminante ya sea orgánico o inorgánico
- No se emplea agentes químicos
- No es tóxico
- Es estable a corrosión fotoquímica y química
- Es abundante y económico

## CÓMO FUNCIONA

La fotocatalisis es una reacción física que consigue eliminar gran parte de los contaminantes. Tiene dos grandes protagonistas: la luz y el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Cuando el óxido de titanio recibe la radiación solar, genera oxidantes capaces de actuar contra los contaminantes del agua (Figura 9).

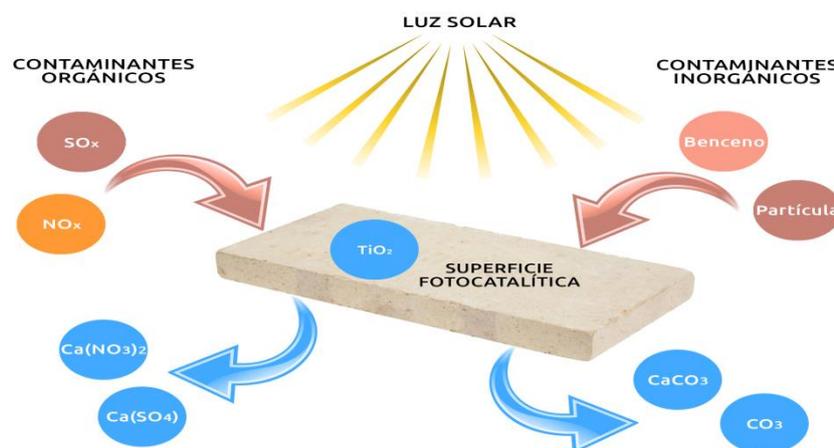


Figura 9. La fotocatalisis y sus componente. Fuente: (Efe, 2017)

## 6.4 USO DE NANOMATERIALES COMO SENSORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry), un sensor químico puede ser definido como un dispositivo que transforma la información química en una señal analítica útil.

La nanotecnología puede permitir a los sensores detectar cantidades muy pequeñas de por ejemplo de vapores químicos. Varios tipos de elementos de detección, como nanotubos de carbono, nanocables de óxido de zinc o nanopartículas de paladio pueden utilizarse en sensores basados en nanotecnología. Debido al pequeño tamaño de nanotubos, nanocables o nanopartículas, unas pocas moléculas de gas son suficientes para cambiar las propiedades eléctricas de los elementos sensores. Esto permite la detección de una concentración muy baja de vapores químicos (Sushma & Richa, 2015).

La estructura básica de un sensor químico incluye dos unidades funcionales: el transductor y el receptor, los cuales se ilustran en la Figura 10.

El receptor (o elemento de reconocimiento) es el componente del sensor químico que se encuentra en contacto directo con el analito, e interactúa selectivamente con él. Esta interacción genera una información química que es transmitida hacia el transductor, el cual está en contacto directo con el receptor. Los nanomateriales se han aplicado como receptores en una gran diversidad de sensores químicos debido a sus excelentes propiedades catalíticas

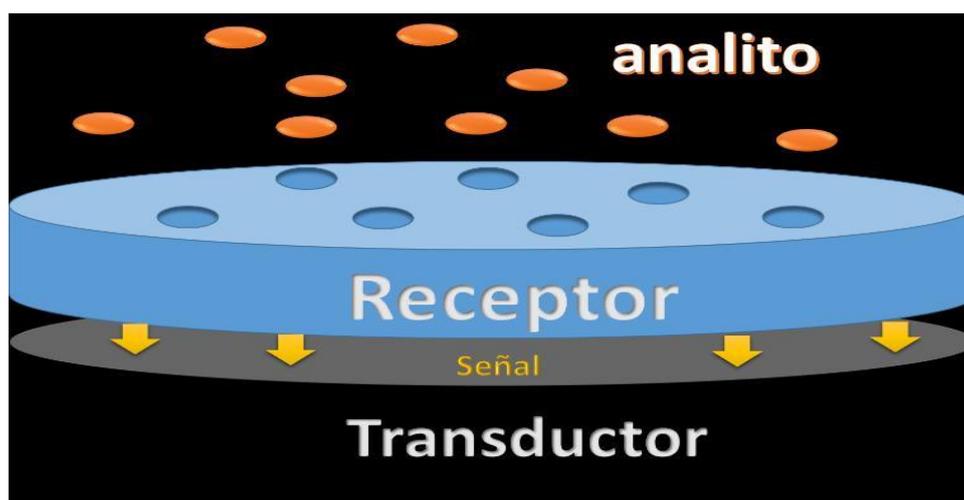
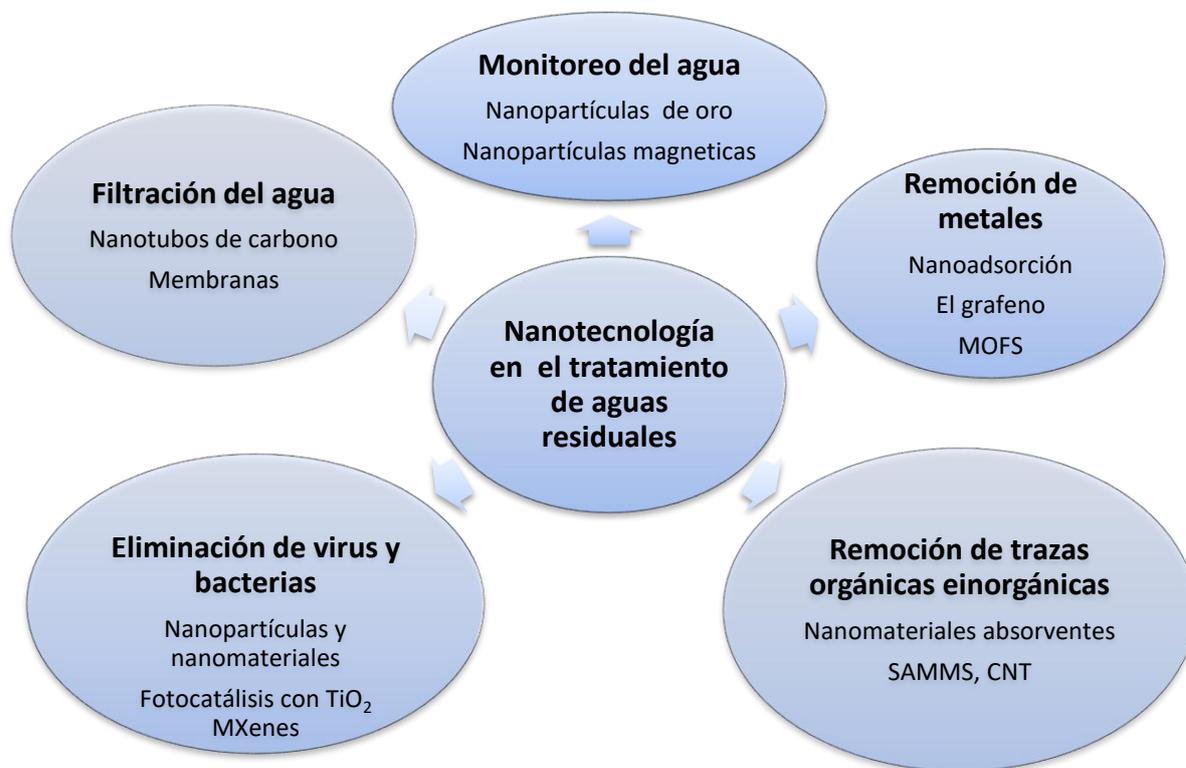


Figura 10. Ilustración de la estructura genérica de un sensor químico

## 6.5 MAPA MENTAL DE APLICACIONES DE NANOMATERIALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.



Mapa mental 1. El mapa mental muestra las diversas utilidades de la nanotecnología para el tratamiento de algunos contaminantes de las aguas residuales y los diferentes nanomateriales que se utilizan.

## 7. BENEFICIOS DE LOS NANOMATERIALES EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

### 7.1 REMOCIÓN DE TRAZAS ORGÁNICAS Y CONTAMINANTES DE INTERÉS RECIENTE

Avances en la química macromolecular están contribuyendo al desarrollo de nanomateriales con propiedades absorbentes mejoradas. Los nanomateriales que pueden servir como absorbentes son los dendrímeros, zeolitas, monocapas auto-ensambladas sobre soportes

mesoporosos, nanopartículas de Hierro, los nanotubos de Carbono y materiales nanoestructurados.

## **7.2 REMOCIÓN DE METALES**

Las aplicaciones de los nanomateriales son cada vez de mayor interés investigativo como alternativa al carbón activado para la eliminación de metales del agua por adsorción, principalmente para el Cromo, Cadmio, Mercurio, Zinc, Arsénico y Cobre.

## **7.3 OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES**

Los nanomateriales cada vez más se están implementando para la eliminación de trazas orgánicas y contaminantes inorgánicos mediante procesos de reducción y oxidación. El TiO<sub>2</sub> es un fotocatalizador prometedor para su uso en la oxidación de los contaminantes durante el tratamiento de agua.

## **7.4 INACTIVACIÓN Y ELIMINACIÓN DE VIRUS Y BACTERIAS**

Las nanopartículas y nanomateriales están actualmente siendo desarrolladas para la inactivación y eliminación de virus y bacterias del agua potable. La inactivación de los virus y otros microorganismos, incluyendo *E. coli* y el bacteriófago MS2, se ha evaluado con fotocátalisis con TiO<sub>2</sub>.

## **7.5 NANO SENSORES**

Los nanomateriales como los nanotubos de Carbono, nanopartículas de oro, puntos cuánticos, y nanopartículas magnéticas pueden resultar útiles para el monitoreo de la calidad del agua, incluyendo el monitoreo de iones metálicos y metales pesados. Los sensores basados en procesos electroquímicos presentan una respuesta rápida, alta selectividad y sensibilidad, especialmente como inmunosensores para el control de los contaminantes en las fuentes de agua

## **7.6 SIMPLIFICACIÓN**

La nanotecnología puede reducir el número de pasos, materiales y energía requerida para purificar el agua, haciendo más fácil la implementación.

## **7.7 REDUCCIÓN DE COSTOS**

Inicialmente la nanotecnología requiere de mucha inversión en investigación, pero una vez adoptada la tecnología, se reducirán sustancialmente los costos para el tratamiento del agua.

## 7.8 INCREMENTO DE LA EFECTIVIDAD

Los contaminantes pueden ser removidos de forma más efectiva, incluso en pequeñas concentraciones debido a la mayor especificidad de nanotecnología y el desarrollo “inteligente” de filtros adaptados para usos específicos (Chávez Lizárraga, 2018).

## 8. NANOPARTÍCULAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Debido a su tamaño que varía entre 1 nm y 100 nm, las nanopartículas poseen diferentes características físicas, químicas y biológicas en comparación con partículas grandes. Estas características especiales permiten varias aplicaciones de los nanomateriales para el tratamiento de aguas residuales. Varios metales y sus óxidos, CNM (Nano compuestos, nanotubo), los MOF se utilizan eficazmente para el tratamiento del agua.

En la tabla 2., se muestra los contaminantes que se pueden remover con diferentes tipos de nanopartículas (Sushma & Richa, 2015).

Nanoparticle	Removed pollutants
Nano catalyst	PCB, Azodyes, Pesticides etc.
Carbon nano tubes	Organic, Aromatic Contaminant
Nano metal Oxide	Heavy metals Radionucleides
Bioactive nanoparticle	Bacteria, fungi
Nano catalytic	Decomposition of organicpollutant inactivation of micro organisms
Membranes	Salts

Tabla 2. Lista de nanopartículas y los contaminantes que eliminan en el tratamiento del agua

### 8.1 METAL Y SUS ÓXIDOS

El metal y sus óxidos han atraído una inmensa atención en el tratamiento de agua debido a su bajo presupuesto y alta eficacia. Entre más pequeño sea el tamaño de las nanopartículas más eficaz es el tratamiento, si la partícula es mayor, menor es la actividad bactericida. Se observó que las nanopartículas muestran dependencia de la forma, en comparación con nanoplacas triangulares truncadas, esféricas y con forma de varilla, mostraron efectos antibacterianos mejorados. El tamaño nano magnético es útil como tratamiento adsorbente (Reza Mahdavian & Al-Sadat Mirrahimi, 2010). Numerosos estudios han sugerido una absorción favorable de

metal nanométrico y óxido de metal hacia contaminantes metálicos como el cadmio, arsénico, cromo, uranio, fosfatos y orgánicos, que muestran una alta eficiencia.

Se ha establecido que las nanopartículas de hierro son reductoras y catalizadoras efectivas para una variedad de contaminantes ambientales que comprenden compuestos orgánicos clorados e iones metálicos. (Dixit & Shukla, 2020)

Las nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{C}$  permite eliminar los colorantes catiónicos de aguas residuales. Las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mostraron una degradación completa de compuestos fenólicos y compuestos de anilina en presencia de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a un pH de 6-7.

El  $\text{FeCo}_2\text{O}_4$  una nanoestructura tipo flor, sintetizada hidrotérmicamente se ha utilizado para degradar los tintes de cristal violeta mediante irradiación solar.

Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  son fotocatalizadores para purificar el agua debido a su buena calidad, no toxicidad y propiedades semiconductoras de bajo costo.  $\text{TiO}_2$  promueve la producción de oxidantes reactivos, para la descontaminación de microorganismos]. La exposición solar durante ocho horas puede reducir varios patógenos del agua. Eso ha demostrado su potencial en la limpieza del agua y del aire mediante la descomposición de compuestos orgánicos volátiles y la mineralización de sustancias no deseadas como sustancias químicas. (Zhang, Shen , & Liu, 2016). En la figura 11 se puede observar un ejemplo de  $\text{TiO}_2$  como catalizador.

La eficiencia se muestran cuando se utilizó nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en aguas residuales a una concentración de 0,5 g / l y se adsorbieron el 99,8% de los iones de Cd, 100% de Pb y 99,2% de Ni (B.D. Desphande, 2019).

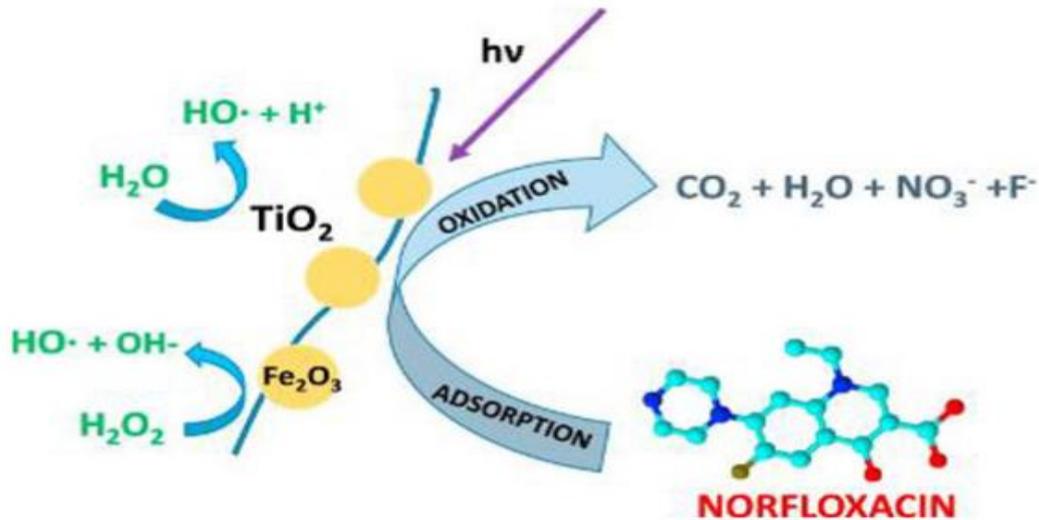


Figura 11. Los catalizadores desarrollados son capaces de convertir el antibiótico norfloxacino en sustancias minerales en presencia de luz y agua oxigenada

## 8.2 NANOMATERIALES DE CARBONO (CNM)

El carbono es un elemento versátil. Sus propiedades de catenación y los alótropos lo hacen especial. Exhibe propiedades de adsorción y conducción, que es ampliamente utilizado en nanotecnología. Los nanomateriales de carbono (CNM) son los materiales que poseen un tamaño de grano del orden de la mil millonésima parte de un metro, debido a su área de superficie relativamente mayor, muestra una alta reactividad química y ofrece características eléctricas, mecánicas y térmicas. Basado en las propiedades anteriores, las nanopartículas se utilizan como una herramienta eficaz para el tratamiento de aguas residuales. Son clasificados como naturales, artificiales e incidentales. CNM diseñados se fabrican según las aplicaciones, grafeno, óxido de grafeno (GO), fullerenos, nanocompuestos, S. (Derrouiche, y otros, 2013)

Varios estudios han testificado que los CMN tienen una alta capacidad de adsorción para metales, azul de metilo productos farmacéuticos, tintes rojos fenoles y productos químicos orgánicos (Seung-Woo, 2015).

Las propiedades de adsorción dependen de varios factores: sitios de adsorción, pureza, área de superficie y grupos funcionales. Entre estos factores, los sitios de adsorción y el área de superficie tienen importancia primordial al influir en la adsorción. Los CMN con grupos funcionales que contienen oxígeno mejoran la capacidad de adsorción, por lo tanto, se agregan deliberadamente durante el proceso de estabilización y la dispersión. Por lo tanto los CNM han

demostrado un gran potencial como sorbentes para eliminar los contaminantes del agua y las aguas residuales (Seung-Woo, 2015).

### **8.2.1 Nanomateriales basados en grafeno**

El grafeno es una simple capa de átomos de carbono organizados en un patrón hexagonal de dos dimensiones. Más duro que el acero y con una gran flexibilidad, se puede imaginar como una hoja de papel con una estructura de átomos de carbono enlazados. El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono, como lo son también el grafito y el diamante.

Es el material más resistente que se conoce en la naturaleza, más fuerte que el acero estructural con su mismo espesor y más duro que el diamante, y, sin embargo, su grosor oscila entre 1 y 10 átomos de carbono.

Es elástico y flexible, y está dotado de una gran conductividad térmica y eléctrica, lo que le permite disipar el calor y soportar intensas corrientes eléctricas sin calentarse. Es prácticamente transparente, hidrófugo y muy denso. Además, presenta otras muchas cualidades, como la alta movilidad de sus electrones.

El grafeno tiene increíbles propiedades mecánicas, electrónicas, químicas, magnéticas y ópticas que lo han convertido en uno de los nanomateriales más estudiados en la actualidad. Además, al ser carbono puro, es abundante en la naturaleza y ecológico.

El grafeno, el grafeno modificado y los materiales de grafeno reducido se utilizan con éxito para eliminar los metales pesados de aguas residuales (Graphenano, 2017).

#### **8.2.1.1 Materiales en base a grafeno para el tratamiento del agua**

Los materiales en base a grafeno han sido ampliamente explorados para el tratamiento del agua y una de sus aplicaciones más estudiadas es para la producción de nuevas membranas de filtración. Membranas basadas en OG (óxido de grafeno) y OGR (óxido de grafeno reducido). Se han utilizado tanto para la separación por filtración en función del tamaño de las distintas moléculas como para la degradación electroquímica de contaminantes. El OGR, al igual que el OG, tiene propiedades antibacterianas y anti-ensuciamiento, y además puede llegar a evitar la corrosión y ser impermeable a ácidos en función de su microestructura. El OG suspendido en agua puede ser fácilmente filtrado sobre papel de filtro y utilizado como membrana donde los átomos de oxígeno introducen una distancia entre las capas atómicas de carbono. Figura 12. El óxido de grafeno se utiliza como adsorbente en la remoción de cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido (Páez Pacheco &

Rincón Castro, 2019). La distancia entre capas de carbono tan precisa puede ser diseñada para permitir pasar a algunas moléculas y retener otras en función de su tamaño; y por ello se han aplicado para la desalinización y la eliminación de contaminantes (Agua, 2019). Las espumas de OGR poseen puntos catalíticos adicionales que promueven la degradación de contaminantes persistentes, la (electro) sorción y eliminación de metales pesados, y la muerte de bacterias. Las espumas de OGR también pueden ser diseñadas para ser altamente hidrofóbicas, y entonces se aplican para la adsorción y eliminación de aceites del agua.

Tecnologías inteligentes y de bajo costo como las membranas, espumas y esponjas basadas en OG Y OGR, con o sin aplicación de corriente, pueden facilitar un uso seguro y sostenible de los recursos hídricos, disminuyendo nuestra dependencia de las redes centralizadas de agua y energía, y minimizando el impacto ambiental de nuestro consumo de agua (Radjenovic & Baptista-Pires, 2019).



**Figura 12. Motores de óxido de grafeno a la micro escala, que son capaces de absorber el plomo de las aguas residuales industriales a partir de un nivel de 1.000 partes por mil millones hasta por debajo de 50 partes por mil millones en tan sólo una hora.**

### **8.2.2 Nanotubos de carbono**

Los nanotubos de carbono (CNT) son uno de esos materiales a nanoescala, hechos de grafito y pueden existir:

Los CNT de pared simple o unidimensionales que muestran propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas exclusivas o también pueden presentarse de paredes múltiples y compuestos.

Los CNT son eficaces para eliminar los iones de metales pesados de aguas residuales. La modificación por grupos funcionales adecuados mejora significativamente la eliminación del metal, lo que permite su uso generalizado aumentando así su accesibilidad a diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos. Tanto los CNT como el grafeno comparten los mismos mecanismos de adsorción de contaminantes. La adsorción puede también depender de la estructura porosa de los CNT [R. (Kumar, Khan, & Haq, 2014).

### 8.2.2.1 Tipos de nanotubos de carbono NTCPS y NTCPM

Existen diferentes tipos de NTC en función con las capas que tienen de grafito, de lo que están formados. Pueden ser nanotubos de carbono de pared sencilla (NTCPS) figura 10A y nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) figura 10B. La estructura de NTCPS consiste de un cilindro hueco que resulta al enrollarse una lámina de átomos de carbono (grafeno) sobre sí misma, estos átomos se encuentran covalentemente enlazados a tres átomos de carbono vecinos mediante una hibridación  $Sp^2$ , quedando el cuarto enlace del carbono deslocalizado entre los demás átomos, sus dimensiones son un átomo de grosor, docenas de átomos de circunferencia, su diámetro varía entre nm con longitudes de hasta 100 micras. En la Figura 13 se muestra la forma en la que se estructuran los átomos de carbono de los NTCPS y NTCPM.

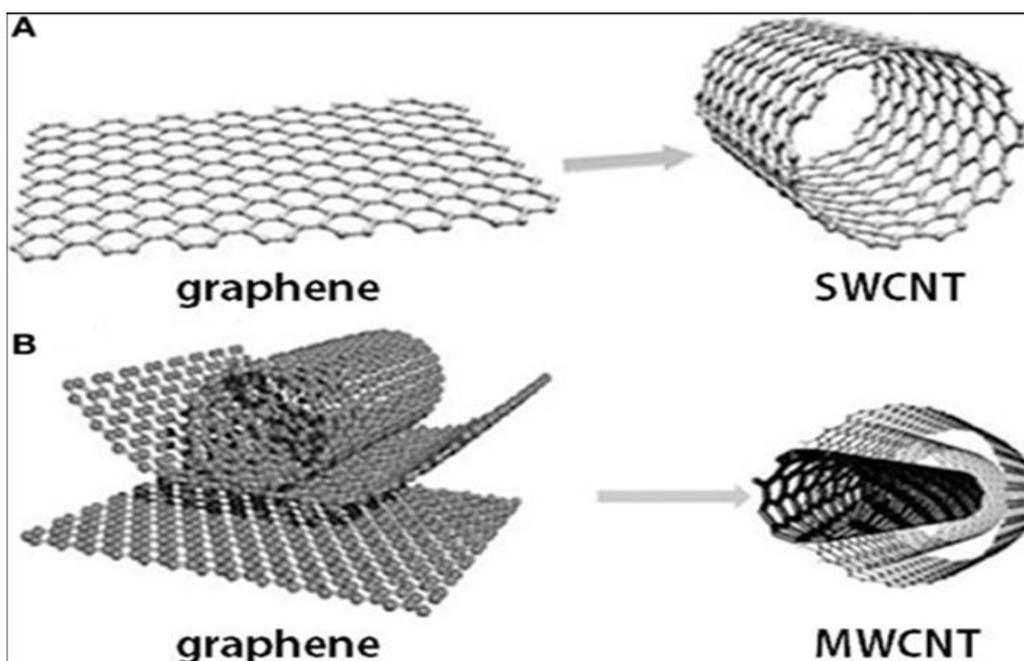


Figura 13. Estructura de nanotubos pared sencilla (NTCPS) y múltiple (NTCPM)4

### 8.2.3 Nitruro de carbono grafítico (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Los nitruros de carbono han atraído atención recientemente debido a su estabilidad, naturaleza ecológica, térmica y estabilidad química y sus diversas propiedades. Entre varios nitruros de carbono el g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> se han considerado el alótropo más estables utilizado ampliamente para la sorción. El nitruro de carbono grafítico (gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) es un fotocatalizador generador de hidrógeno a través de la división del agua. EL gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> se sintetiza por condensación térmica de precursores ricos en nitrógeno con una estructura de anillo de tri-s-triazina como cianamida, dicianamida, urea o tiourea, lo que da como resultado una estructura similar al grafeno después de la exfoliación (Figura 14). Estas nuevas nanopartículas son una versión modificada, que poseen propiedades fisicoquímicas mejoradas para eliminar metales pesados de aguas residuales. El nitruro de carbono de grafito (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) es bien conocido como uno de los materiales más prometedores para las actividades fotocatalíticas, como la reducción de CO<sub>2</sub> y la separación del agua, y la remediación ambiental mediante la eliminación de contaminantes orgánicos (Darkwah, 2018).

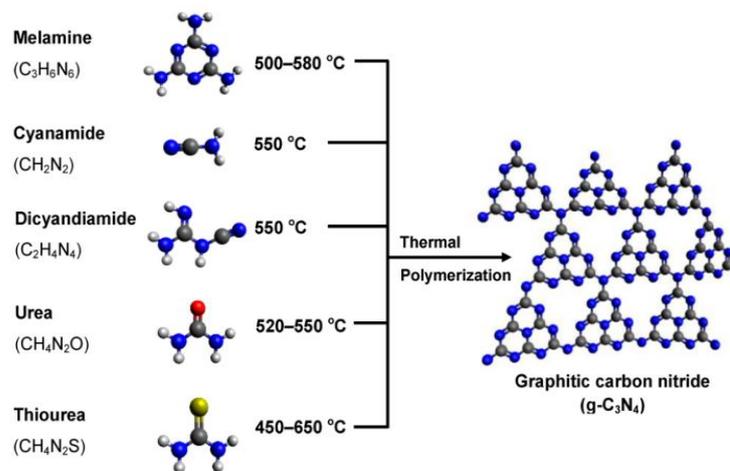
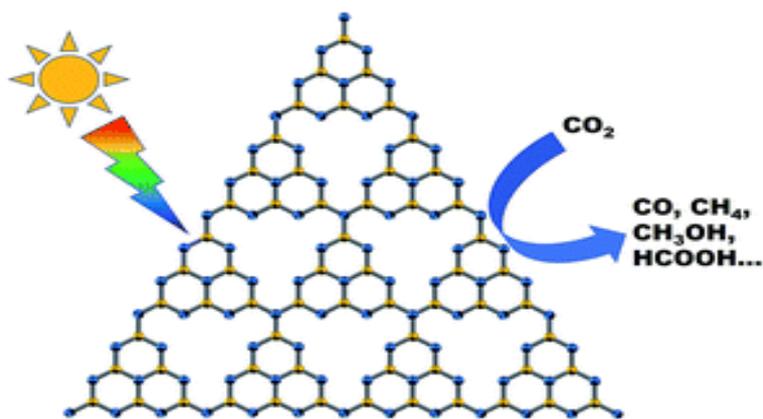


Figura 14. Ilustración esquemática del proceso de síntesis de los posibles precursores de gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Reproducido con permiso de Ong, WJ; Tan, LL; Ng, YH; Yong, ST; Chai, SP **Fotocatalizadores basados en nitruro de carbono grafítico (gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) para la foto**



**Figura 15. Cristales individuales miden desde 10s micrones hasta ~ 100 nm en tamaños laterales en forma de capas. Este producto está muy cristalizado. Los productos amorfos se han filtrado y separado mediante procesos de centrifugación.**

### **8.3 ESTRUCTURAS METALORGÁNICAS (MOF)**

Los MOFs son sólidos metal-orgánicos cristalinos y porosos formados por la unión covalente coordinada de iones o clústeres metálicos y moléculas orgánicas, denominadas ligandos, dando lugar a moléculas neutras. Estos materiales se caracterizan por poseer grandes volúmenes de poro y las áreas superficiales más elevadas conocidas hasta la fecha, L.V. (Bora & Mewada, 2017)

Presentan un gran número de aplicaciones, por ejemplo, catálisis, adsorción, encapsulación de aditivos, separación de gases, etc.

Los MOF se sintetizan por la coordinación de ligandos orgánicos con precursores de iones metálicos (figura 15) (Yihan Wu, 2019). (Jie Li, Organic framework-based materials: superior absorbents for the capture of toxic and radioactive metal ions, 2018). Los ligandos orgánicos utilizados pueden ser ácido benzoico, fosfato, piridina, aminas, imidazol, piperazina, sulfonatos y carboxilatos, y los precursores metálicos usados son tales como Fe (III), Al (III), Cu (II), Ca (II), Cd (II), Zn (II), Co (II), Pb (II), Ti (III), Co (III), Zr (IV), y Ln (III). Los MOF muestran una mejor absorción que otros materiales (Ricco, 2015). Una variedad de adsorbentes basados en MOF se utilizan con éxito para la eliminación de contaminaciones por metales pesados. El mecanismo varía dependiendo del ión metálico y del ligando.

Los contaminantes de iones metálicos son tóxicos desde el punto de vista biológico y ambiental, sus efectos nocivos sobre el medio ambiente y la salud humana son terribles. Para

la eliminación de tales iones de metales pesados se introducen ciertos nanómetros novedosos, como los orgánicos, g-C3N4 y MXenes. Los MXenes son nanoláminas de  $Ti_3C_2Tx$ , que forman una red bidimensional, como en la es figura 14. Tienen propiedades biológicas, como agente antibacteriano y purificación del agua.

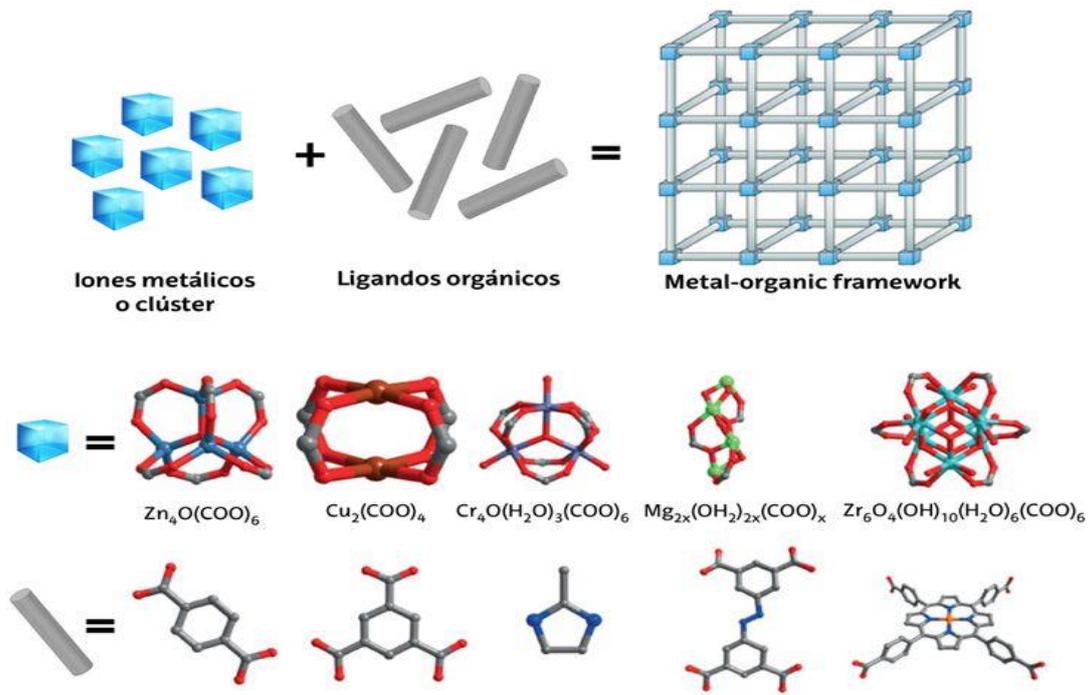


Figura 16. Elementos básicos de conformación de un material MOF y los clústeres metálicos y ligandos orgánicos más utilizados. Fuente: (Amayuelas, 2018)

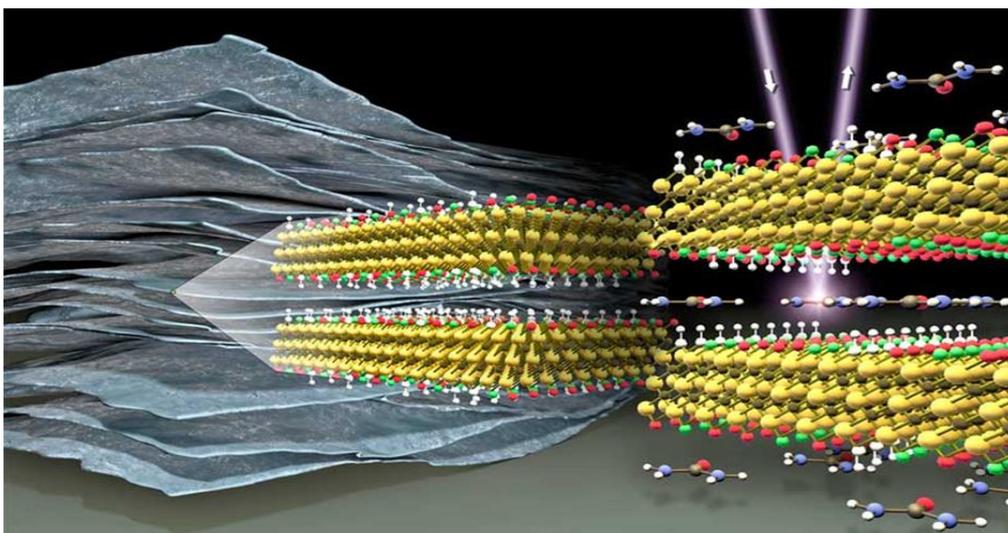


Figura 17. Los MXenes son materiales 2D que forman partículas de varias capas

#### **8.4 HIERRO NANOVALENTE CERO**

Las comodidades modernas han generado una gran cantidad de desechos orgánicos, inorgánicos, biodegradables y no biodegradables.

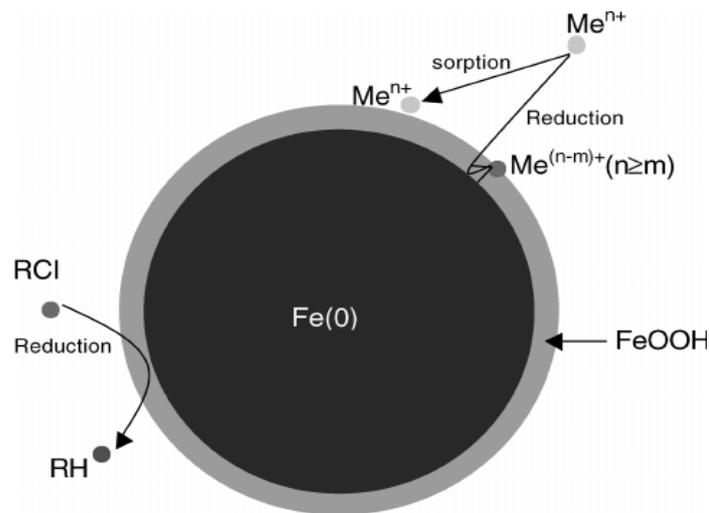
Los nanomateriales derivados de hierro cero-Valente (ZVI) poseen las siguientes características:

- \* Tamaños muy pequeños, permitiendo su fácil alojamiento en los sitios contaminados
- \* Área superficial muy grande, facilitando el contacto cercano con los contaminantes elevándola eficiencia de descontaminación.
- \* Presencia de sitios activos, mejorando su re-actividad.
- \* Se encuentran soluciones coloidales, por lo que se pueden inyectar directamente en suelos, acuíferos contaminados.
- \* Muy buena adsorción y propiedades reductoras, permitiendo adsorber y reaccionar metales pesados como Hg, Ni, Cd, Pb, Cr.

Gran cantidad de metales pesados tóxicos (As, Cr, Ni, Cd, Hg y U) de la minería, industrias, desechos agrícolas y actividades humanas que eventualmente dañan a los seres humanos y al medio ambiente. Gracias a las propiedades que posee el Fe(0) y a la capacidad de absorción de los óxidos situados en la corteza de la nanopartícula forman especies menos tóxicas. Estos metales tóxicos pueden eliminarse mediante su adsorción de nuevos nanomateriales.

La inmovilización de compuestos orgánicos, especialmente de orgánicos halogenados. El mecanismo de eliminación es el de reducción ya que Fe(0) se oxida, cediendo electrones que aceptan compuesto orgánico, reduciendo y formando compuestos hidrocarburos y cloruros

La eficacia aumenta diez veces cuando el tamaño del nanomaterial disminuye aún más a nanoescala de hierro de valencia cero (nZVI), que es altamente reactivos hacia una variedad de contaminantes orgánicos. Debido a la gran masa a volumen, proporciones y dimensiones microscópicas (varía de micrón a nanoescala) ZVI respalda la dispersión subterránea eficaz y la inyección, (Ding, Pang, & Wu, 2018) en efluentes acuosos para el tratamiento de contaminantes.



**Figura 18.** El modelo de núcleo-capa de nanopartículas de hierro de valencia cero. El núcleo se compone principalmente de hierro de valencia cero y proporciona el poder reductor para reacciones con contaminantes ambientales.

## 9. FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN

El uso de la nanotecnología en el tratamiento de agua ha demostrado según estudios que ayudan en tratamientos como desalinización, desinfección y depuración. Los nanomateriales principalmente se han utilizado en adsorbentes, membranas, sensores en la calidad de agua y en fotocatalisis, lo cual convierte a esta tecnología como un campo lleno de posibilidad para el sector de tratamiento de aguas (Suárez, 2016).

La adsorción depende de varios factores, principalmente de la superficie en relación con la masa, tiempo de contacto, dosis de adsorbente, pH y temperatura.

La naturaleza y la superficie del adsorbente juegan un papel importante en el proceso de adsorción. El grado de adsorción aumenta con el aumento de rugosidad, porosidad y superficie. El carbón, el gel de silicona y el grafito son excelentes adsorbentes.

## 10. NANOPARTÍCULAS DEL SISTEMA AL MEDIO AMBIENTE

Los nanomateriales son sustancias químicas de diferentes formas, con el tamaño de partículas por debajo de 100 nm. Principalmente son metales pesados o sus óxidos, carbono y sus alótropos, o polímeros modificados.

Varios nanomateriales para desinfección de agua, (naturales y fabricados) (Li, Zhao, & Xi, 2016) han mostrado tener extraordinarias propiedades antimicrobianas incluyendo: quitosano, nanopartículas de plata (nAg), TiO<sub>2</sub> fotocatalítico, fullerol, nanopartículas de fullerenos acuosos (nC<sub>60</sub>), nanotubos de carbono (CNT)

Los nanomateriales en el agua no afectan directamente a los humanos, pero existe la posibilidad de que se puedan ingerir nanomateriales al consumir pescados. Por lo tanto, el impacto de los nanomateriales en organismos acuáticos debe ser tomado en cuenta. Los efectos dañinos de los nanomateriales en organismos acuáticos están relacionados principalmente a nanopartículas (Chávez Lizárraga, 2018).

Aunque la nanotecnología es prometedora para el futuro en el tratamiento de agua, tiene aún mucho que investigar para su aplicación. Se debe tener en cuenta que las nanopartículas al ser liberadas en los cuerpos de agua, puede provocar las siguientes consecuencias:

(a) Encontrar en trazas (1g / l), no tóxico, se puede recargar / reutilizar para otras aplicaciones.

(b) Si se encuentra en grandes cantidades (mg / l), pueden perturbar la vía de tratamiento, aumentar la turbidez, ensuciar además estabilizadores, modificadores, minerales arcillosos inorgánicos y compuestos como caolita, zeolita, polisulfuros de calcio (Li, Ai, & Jiang, 2016). En comparación con el material poroso soportado nZVI, los minerales inorgánicos interactúan con los contaminantes naturales y pueden prevenir la acumulación y migración de contaminantes.

Hasta ahora no se puede estimar la presencia de nanopartículas en las aguas y eliminarlas en los procesos de tratamiento y como consecuencia, esto conduce a lodos, vertedero y eutrofización.

## 11. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### **Temas para reflexionar,**

¿Por qué la nanotecnología está revolucionando nuestro día a día?

Principalmente porque el control y ensamblado de la materia a la escala del nanómetro (1 nm = 10<sup>-9</sup> m) permite obtener materiales, aparatos y sistemas novedosos con propiedades únicas. Y es que al manipular la materia a una escala tan pequeña, ésta demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas permitiendo diseñar materiales con propiedades a la carta. De

ahí que durante los últimos años, la nanotecnología se haya convertido en una alternativa prometedora para mejorar el tratamiento de aguas.

Los trabajos que se analizaron para el tratamiento de agua residuales utilizando la nanotecnología muestran aspectos que permiten responder a algunas de las preguntas no a todas, como las siguientes:

¿Qué tipo de nanomateriales o nanodispositivos se van a utilizar para el tratamiento de aguas residuales?

¿Cómo pueden usarse las nanotecnologías para garantizar el acceso a agua potable en aquellos sitios en los que ahora hay dificultades para encontrarla?

¿Cómo se usará la nanotecnología para la depuración de contaminantes en el agua?

¿Cómo afectará la nanotecnología en la eliminación de las trazas de los nanopartículas que quedan en el medio ambiente?

Seguramente se encontrará abundante información sobre materiales o dispositivos que den respuesta a algunas de estas preguntas. Algunos ejemplos de temas concretos aparecerán en trabajos como es:

\* El uso de nanopartículas magnéticas para depuración de aguas.

\* Membranas basadas en grafeno.

\*Materiales nanoestructurados porosos para la depuración o desalación de agua.

\*Nanomateriales como el grafeno como material para ser usado como antibacteriano en diferentes tipos de agua contaminadas.

## **11.1 CONSIDERACIONES FINALES**

La producción de NMs, ha aumentado en los últimos años. Reportes recientes determinan que las NPs de SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZNO, CeO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, son las que más se producen, pero los datos son diferentes a lo que realmente se procesan. Nowack y col 2015. Probablemente la cantidad de nanomateriales se incremente significativamente en el mundo. En América Latina desde hace unos años se han realizado reuniones para evaluar los potenciales riesgos del uso de nanomateriales y la necesidad de tener una legislación normativa para el uso de las nanotecnologías ya que el aumento del uso de nanomateriales en muchos países de la región

lleva a riesgos para la salud humana y el medio ambiente y no se tiene una información sobre los efectos que estos causan. Gestión y reglamentación de riesgos para la salud y medio ambiente 2013.

El desarrollo y el uso de la nanotecnología y los nanomateriales generan preocupación ya que por lo menos en Colombia no existe una legislación (V seminario de microbiología aplicada. Barranquilla 2019) que ordene a las autoridades medio ambientales regular el uso de nanopartículas en muchos productos que finalmente llegan a las corrientes de agua residual que son el principal medio para el transporte de nanocontaminantes en el ambiente (OCDE, 2016). Esto conlleva a crear un conflicto cuando las interacciones entre los nanomateriales utilizados en el tratamiento de aguas residuales y los nanocontaminantes se comportan de forma diferente por sus propiedades físicas, químicas y biológicas que pueden cambiar y generar toxicidad que aún no se conoce. Finalmente se requiere evaluar constantemente las propiedades de los nanomateriales que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales y analizar si es conveniente correr riesgos y enfrentar las consecuencias a largo plazo de los efectos que podrían darse en la salud humana y en los ecosistemas biológicos que perturben el equilibrio de la naturaleza. Teniendo en cuenta este pequeño razonamiento es necesario tomar decisiones responsables, tener lineamientos para impulsar la investigación y el desarrollo de la nanotecnología pensando en nuestras generaciones futuras y en el bienestar de nuestro planeta

## **11.2 INCERTIDUMBRES DE LA NANOTECNOLOGÍA:**

Para el caso particular de Colombia, en estos momentos existe un incremento en materia de desarrollo de aplicaciones de nanomateriales en diferentes procesos como purificación de agua, remoción de contaminantes, entre otros, y es por eso que universidades en su mayoría y centros de investigación de varias compañías generan esfuerzos para estar a la vanguardia con la ciencia a escala nano.

Ante tantos desarrollos y aplicaciones de la nanotecnología se ha ido dejando de lado un componente demasiado importante y que ha sido el precio más grande de la ciencia desde que tenemos uso de razón: la vida humana. En Colombia, los temas de salud ocupacional y de seguridad del trabajador en los campos de la nanotecnología son poco discutidos y generan una alta preocupación en la comunidad científica de la salud debido a las propiedades particulares de los nanomateriales como su alta reactividad, conductividad de calor y electricidad, entre

otras, las cuales son atribuidas a su tamaño tan pequeño, lo que los hace más fáciles de ingresar al cuerpo humano.

Estudios científicos (Tanaka, Inoue, Shimada, Mimura, & Takano , 2019) han concluido que algunos tipos de nanopartículas captadas por vía respiratoria como nanotubos de carbono y compuestos de cerio, generan desórdenes en los mecanismos biológicos del cuerpo, desencadenando diversas patologías que pueden llegar a ser letales. Ahora, a pesar de que en el mundo se han desarrollado dispositivos para medir nanomateriales en el ambiente de trabajo, aún no son claros los límites de exposición, por lo que resulta paradójico medir sin saber lo permisible en cuanto a exposición del trabajador. Por esto, se debe generar una conciencia de prevención en todos los procesos de producción y manipulación de nanomateriales.

Desafortunadamente, con estos beneficios hay ciertas preguntas sin respuesta, como el reciclaje de nanopartículas, a excepción de las nanopartículas magnéticas, sigue siendo un desafío y un asunto costoso, comúnmente inestable, debido a la presencia de van der Waals obliga a aglomerarse. Si no se recupera, eventualmente termina en eutrofización.

## **12. CONCLUSIONES**

En la revisión bibliográfica del uso de la nanotecnología para mejorar el tratamiento de las aguas residuales se puede mostrar:

- \* La importancia de las nanopartículas en el tratamiento del agua es indudable un escenario actual. Las nanopartículas se utilizan ampliamente como fotocatalizadores, adsorbente y desinfectante eficaz para la depuración de aguas residuales.
- \* Los nanomateriales poseen diferentes características que permiten utilizarlos en plantas de tratamiento de agua residuales. Muestran una fuerte actividad antibacteriana, son altamente adsorbentes para retirar del agua metales pesados, aceites, disolventes orgánicos y contaminantes emergentes que mejoran la eficiencia de las nanopartículas.
- \* Las aplicaciones de la nanotecnología y los nanomateriales es muy amplio y se puede utilizar en diferentes áreas del conocimiento como: Química, medicina, biología, física, electrónica, industria, medio ambiente y muchas más áreas.

\*El diseño de un mapa mental en el tratamiento de las aguas residuales muestran los beneficios del uso de la nanotecnología en este campo.

\*Se encuentra una gran cantidad de información, sin embargo, no es muy claro cómo utilizar la nanotecnología sin conocer los riesgos antes de su aplicación.

\*Se considera que la información revisada es de gran interés y los nanomateriales como las nanopartículas de plata, dióxido de titanio o los nanotubos de carbono, muestran actividades antimicrobianas superiores que los desinfectantes comúnmente utilizados, permitiendo acabar con aquellos microorganismos no deseados presentes en las aguas. Además, son varios los nanomateriales que muestran altas capacidades de adsorción para retirar del agua metales pesados, aceites, disolventes orgánicos y contaminantes emergentes que en ocasiones escapan de los sistemas actuales de tratamiento

### 13. BIBLIOGRAFÍA

(2017). *AQUAE*.

Agua. (2019). grafeno en el tratamiento de aguas. *agua*.

al, D. e. (2020). process design for wastewater treatment. *water Science and technology*.

Amayuelas, E. (06 de 04 de 2018). *Naukas ciencia, escepticismo y humor*. Obtenido de <https://naukas.com/2018/04/06/polvos-magicos-para-todo/>

Andina, J. S. (2018). nanotechnology an alternative for wastewater treatment: advances, advantages and disadvantages. *nanotechnology an alternative for wastewater treatment: advances, advantages and disadvantages*.

Andina, J. S. (2018). nanotechnology an alternative for wastewater treatment.

AQUAE, F. (19 de 02 de 2017). *CAMPUS La revolución de las ideas*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/aguas-residuales-datos-usos/>

Aurelia, C. L. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 52-61.

- Ávalos, A. (2013). NANOPARTÍCULAS DE PLATA: APLICACIONES Y RIESGOS TÓXICOS PARA LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 1-23.
- B.D. Desphande, P. (2019). Advanced, oxidative degradation of benzoic acid and 4-nitro benzoic acid A comparative study advanced. *Biología*. (18 de Julio de 2014). Obtenido de harrinsonw.blogspot.com
- Bora, L., & Mewada, R. (2017). Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: Fundamentals, mechanisms and parametric review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1393-1421.
- Chaturvedy. (2012).
- Chávez Lizárraga, G. A. (2018). Nanotechnology an alternative for wasterwater treatment: advances, advantages and disadvantages. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 52,61.
- Chofre, A. (8 de Enero de 2020). *¿Es lo mismo un organismo modificado genéticamente que un transgénico?* Obtenido de <https://genotipia.com/es-lo-mismo-un-organismo-modificado-geneticamente-que-un-transgenico/>
- Chong. (2010).
- Chunling Luoa, C. L. (2011). Contaminación por metales pesados en suelos y verduras cerca de un sitio de procesamiento de desechos electrónicos.
- Darkwah. (2018). mini revision sobre la estructura y propiedades. *nanoescala*.
- Delgado, J., Romero Arellano, V. H., Guzmán González, C. A., & Sulbarán Rangel, B. C. (2018). *Aplicaciones de la nanotecnología para el tratamiento y remediación de agua contaminadas*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Derrouiche, S., Bourdin, D., Roche, P., Houssais, B., Machinal, C., Coste, m., . . . Bordeje, G. (2013). Process design for wastewater treatment: catalyticozonation of organic pollutants. *Water Science & Technology*, 1377-1383.
- Deshpande, B., Agrawal, P., Yenkie, M., & Dhoble, S. (2020). Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenges. *Nano-Structures & Nano-Objects*.
- Ding, C., Pang, H., & Wu, Y. (2018). Macroscopic and microscopic of uranium elimination by Ca-Mg-Al layered double hydroxide supported nanoescala Zero Valent iron. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2657-2665.
- Dixit, M., & Shukla, P. (02 de Noviembre de 2020). *Microbial nanotechnology for bioremediation of Industrial Wastewater*. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2020.590631/full>

Efe. (27 de 6 de 2017). *ABC Sociedad*. Obtenido de [https://www.abc.es/sociedad/abci-94-por-ciento-poblacion-respira-aire-contaminado-espana-segun-ecologistas-201706271459\\_noticia.html](https://www.abc.es/sociedad/abci-94-por-ciento-poblacion-respira-aire-contaminado-espana-segun-ecologistas-201706271459_noticia.html)

El grafeno: Propiedades y aplicaciones. ( Propiedades y aplicaciones).

*En la escala nonométrica*. (15 de Febrero de 2010). Obtenido de <http://lonano.blogspot.com/2010/01/definicion-y-caracteristicas-escala.html>

FAO. (2 de 08 de 2015). *Una base de datos de acceso libre ayudará a los países con escasez de agua*. Obtenido de <http://www.fao.org/news/story/es/item/326171/icode/>

FAO. (2016). *AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura*. Obtenido de <http://www.fao.org/aquastat/es/overview/>

Feng, L., & Astruc, D. (2018). Nanomaterials for removal of toxic elements from water. *Coordination chemistry reviews*, 147-154.

Fibras y normas de Colombia. (2018). *Blog Fibras y normas de colombia*. Obtenido de <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/aguasresiduales-clasificacion-y-caracteristicas>

Generate express. (2021). *tratamiento de aguas residuales*.

Graphenano. (Julio de 2017). *El grafeno: Propiedades y aplicaciones*. Obtenido de <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>

<https://www.graphenano.com/que-es-el-grafeno>. (2017).

<https://doi.org/10.1186/s11671-018-2702->. (2018).

<https://www.iagua.es/blogs/jordi-fabregas-garriga/grupo-icratech->. (s.f.).

ie Li, G. Z. (2018). Organic framework-base material: superior absorbents for the capture of toxic anmd radioactive.

Iriarte Mendívil, R. (2020). *Nuevas tendencias en sistemas de purificación de aguas*. Valencia: Universitat Politècnica de València (ETSIAMN).

Jie Li, G. Z. (s.f.). based materials: su framework.

Jie Li, G. Z. (2018). Organic framework based materials: superior absorbents the capture of toxic and radiactive.

Jie Li, G. Z. (2018). Organic framework-based materials: superior absorbents for the capture of toxic and radioactive metal ions.

jordi Morató, G. P. (2017). *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas*.

Kumar, R., Khan, M., & Haq, N. (2014). Application of carbon nanotubes in heavy metal remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37-41.

- Li, X., Ai, L., & Jiang, J. (2016). Nanoscale zerovalent iron decorated on graphene nanosheets for Cr removal from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 789-797.
- Li, X., Zhao, Y., & Xi, B. (2016). Decoloration of methyl orange by a new clay-supported nanoscale zero valent iron: Synergetic effect, efficiency optimization and mechanism. *Journal of Environmental Sciences*, 1-10.
- Makhluf, S., Dror, R., Nitzan, Y., Abramovich, Y., Jelinek, R., & Gedanken, A. (2005). microwave-assisted synthesis of nanocrystalline MgO. *Advanced functional materials*, 1708-1715.
- Manzanas, J. (2019). Qué es la nanotecnología. Características y evolución. *Otech*.
- Morató, J., & Peñuela, G. (2018).
- Morelli, I., Coppotelli, B., Madueño, L., & Del Panno, M. (2015). La biorremediación en la era post-genómica. *Química viva*, 26-35.
- nanotechnology an alternative for wastewater treatment: advances, advantages and disadvantages. (2018). *Journal of the Selva Andina Research Society*.
- Navarro Ferrer, R. (4 de Enero de 2021). *Nanotecnología que debes conocer*. Obtenido de <https://nanova.org/avances-de-la-nanotecnologia>
- Nuevo, D. (2017). *Los procesos de depuración de aguas residuales*. EDAR.
- Nuevo, D. (2021). los procesos de depuración de aguas residuales.
- OCDE, O. p. (2016). *Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts*. DOI.
- Páez Pacheco, H., & Rincón Castro, L. (2019). *Uso del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido*. Bogotá D.C: Ciencia Unisalle.
- Radjenovic, J., & Baptista-Pires, L. (18 de Noviembre de 2019). *Grupo ICRATech(III): Grafeno en el tratamiento de aguas*. Obtenido de <https://www.aigues.net/grupo-icratech-iii-grafeno-en-el-tratamiento-de-aguas/>
- Raffino, M. (4 de septiembre de 2020). *Concepto de nanotecnología*. Obtenido de <https://concepto.de/nanotecnologia/>.
- Raffino, M. e. (2020). *Nanotecnología*. Infobae.
- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 71-80.
- Rafin, M. E. (s.f.). María Estela Rafino.
- rafino, m. e. (2020). concepto de nanotecnología. *etecé*.
- Revilla Calcina, C. (2018). Preocupados: contaminación del agua a causa de la minería. *Iagua*.

- Reza Mahdavian, A., & Al-Sadat Mirrahimi, M. (2010). Efficient separation of heavy metal cations by anchoring polyacrylic acid on superparamagnetic magnetite nanoparticles through surface modification. *Chemical Engineering Journal*, 264-271.
- Ricco, r. (2015). uptake by aluminium based magnetic framework composites (MFCs) in watematerials chemistry.
- Rodríguez Pimentel, H. (2017). Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. *Iagua*.
- Romero, J. (2018). *Aguas residuales industriales*. Bogotá: E. Colombiana de ingeniería.
- Seung-Woo. (2015). Adsorption characteristics.
- SOGAMA. (2018). Investigadores de la UNAM desarrollan nanofibras para purificar el agua. *RETEMA*.
- Suárez, B. P. (22 de Junio de 2016). *La nanotecnología para el tratamiento de las aguas*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/baltasar-penate/nanotecnologia-tratamiento-aguas>
- Sushma, D., & Richa, S. (2015). Use of Nanoparticles in water treatment. *International Research Journal of Environment Sciences*, 103-106.
- Tanaka, M., Inoue, K.-i., Shimada, A., Mimura, T., & Takano, H. (2019). Effects of Repeated Pulmonary Exposure to Carbon Nanotubes on Lung function. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 120-124.
- TECPA. (2017). *Los procesos de depuracion de agus residuales*. EDAR.
- Tyagi, S., Rawtani, D., Khatri, N., & Tharmavaram, M. (2018). Strategias for nitrate removal from aqueos environment using nanotechnology. *Journal of Water Process Engineering*, 84-95.
- Universidad de Alicante. (s.f.). *Nanocomposites*. Obtenido de <https://web.ua.es/es/remam/investigacion/nanocomposites-y-grafeno/nanocomposites.html#:~:text=La%20principal%20aplicaci%C3%B3n%20de%20los,que%20destacan%20los%20nanocomposites%20polim%C3%A9ricos>.
- URA. (2011). Obtenido de [https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/documentacion/2011\\_tecnalia\\_nanofibras/es\\_def/adjuntos/Tecnalia\\_RESUMEN%20Web%202011.pdf](https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/documentacion/2011_tecnalia_nanofibras/es_def/adjuntos/Tecnalia_RESUMEN%20Web%202011.pdf)
- URA. Agencia Vasca del agua. (2011). *Tratamiento de agus contaminadas con sustancias prioritarias y emergentes mediante tecnología innovadora basadas en nanofibras*. URA.
- wikimedia. (2019). *esquema etapa de tratamiento de un EDAR*.
- WIKIMEDIA. (2019). *Esquema.Etapa de tratamiento de un EDAR*.

- yanyang Zhang, B. W. (2016). Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment. 22 - 39.
- Yanyang Zhang, B. W. (2016). Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment. 22- 39.
- Yihan Wu, H. P. (2019). Environment remediation of heavy metal ions by novel-nanomaterials. 608-620.
- Zeng, Y., & Xue, Y. (2017). Removal of fluoride from aqueous solution by TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanocomposite. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 25-32.
- Zhang, Y., Shen, H., & Liu, Y. (2016). Synergistic effects of F and Fe in co-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research* volume.