

**TÉCNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE ACIMIENTO
PARA SU APROVECHAMIENTO EN LA AGRICULTURA**

JEAN PIERRE MALAGON QUENZA

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ORIENTADOR

HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA

MSC INGENIERÍA QUÍMICA

PHD ENERGÍAS RENOVABLES

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. mayo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos	10
1. MARCO REFERENCIAL	11
1.1. Agua de formación.	11
1.2. Concepto.	11
1.3. Formas de obtención.	12
1.4.1. Propiedades	13
1.4.2. <i>Tratamiento del agua de formación</i>	16
1.4.3. Sistema de Recogida de Aceite	16
1.4.4. Parámetros de coagulación y floculación.	18
2. TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE YACIMIENTO	24
2.1. Membranas nanocompuestas.	24
2.2. Colorantes mediante fotocatalisis con TiO ₂ usando luz artificial y solar	27
2.3. Efecto de amplitud y pulso en ultrasonidos de baja frecuencia	28
2.4. Eliminación biológica del nitrógeno	29
2.5. Nanopartículas	32
2.6. Desalinización electroquímica.	34
2.7. Material organofílico hinchable	36
3. PROCESO SELECCIONADO PARA LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE YACIMIENTO PARA SU USO EN LA AGRICULTURA	38
BIBLIOGRAFIA	40

TABLA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.	14
<i>Tipo de agua con valores de Salinidad (parte por mil)</i>	
Figura 2.	18
<i>Esquema de un sistema de producción de hidrocarburos.</i>	
Figura 3.	22
<i>Criterios utilizados para evaluar el alcance de la contaminación de las aguas superficiales.</i>	
Figura 4.	26
<i>Visión general sobre el progreso de las membranas nanocompuestas.</i>	
Figura 5.	32
<i>Representación esquemática de las reacciones implicadas en el ciclo biológico del nitrógeno.</i>	
Figura 6.	33
<i>Aplicaciones de diferentes tipos de Nanopartículas (NPs).</i>	
Figura 7.	35
<i>Diagrama que muestra una configuración simplificada del sistema EDR (arriba a la izquierda), pila de EDR a gran escala (arriba a la derecha), producción de membranas (abajo a la izquierda) y membrana (abajo a la derecha).</i>	
Figura 8.	37
<i>Modelo propuesto de la absorción de orgánicos disueltos por medio de vidrio hinchable.</i>	

RESUMEN

En el presente documento tiene como objetivo analizar las tecnologías de tratamiento de agua de yacimiento que se puedan utilizar en la industria petrolera de Colombia, con el fin de obtener un conocimiento que ayude a mejorar la gestión de manejo y reutilización del agua, dado que la producción de agua en el proceso de extracción del crudo siempre estará presente hasta el agotamiento del recurso no renovable como lo es el petróleo; teniendo en cuenta, que estas aguas al ser extraídas contienen una variedad importante de contaminantes que deben ser caracterizados para ser tratados, y al finalizar el proceso de descontaminación, esta agua se pueda utilizar en el ámbito industria de la agricultura. Es importante tener en cuenta la importancia de tratar y aprovechar de una mejor manera el agua que no sea potable, en especial las aguas de formación de yacimiento de hidrocarburos que constituyen un mayor riesgo ambiental, debido a que logran producir 8 veces más volumen de agua que petróleo producido, lo cual traen compuestos químicos que al entrar en contacto con el agua potable que están presentes en acuíferos, pueden cambiar la composición y contaminarlas, llegando a alterar el hábitat acuático y terrestre en el área de influencia o descarga directa e indirectamente, por lo anterior mencionado, se selecciona el mejor proceso de tecnología para el tratamiento del agua de producción y su adecuado uso en la industria de la agricultura, a través del sistema de riego por fertirrigación donde se le implementaran nutrientes y minerales al agua para que funciones como abono para los cultivos.

Palabras claves: Agua de yacimiento, tecnologías, tratamiento, contaminantes.

INTRODUCCIÓN

“Actualmente más del 98% del petróleo crudo producido en el mundo viene asociado con agua. Por lo general, a medida que el yacimiento envejece, la producción de crudo disminuye y el corte de agua aumenta.” (Dávila & Torres, 2013). En Colombia la industria petrolera durante los últimos 10 años ha ido en aumento la generación de barriles de agua y esto se logra evidenciar en “la relación agua-petróleo (RAP), donde el promedio del RAP en Colombia es de 12 barriles de agua por barril de crudo (Ecopetrol, 2020), los cuales se extraen en los trabajos de perforación y producción; esto permite la realización de nuevos estudios y avances en conocimiento del subsuelo gracias a sus componentes químicos, a través de la aplicación de procesos tecnológicos que permite realizar análisis del agua con mayor claridad, y que en la actualidad se logre aprovechar en desarrollos de actividades en la industria de la agricultura, empleando tecnologías de tratamiento del agua y vertimiento en los campos de cultivo, generando un avance en el manejo y aprovechamiento de este importante recurso natural producido en la industria petrolera en otros ámbitos diferentes a trabajos de campo petroleros.

El agua de formación siempre se ha conocido como una fuente de contaminación, pero eso sucede solamente cuando es dispuesta sin pasar por tratamiento y eliminación de contaminantes, la cual esta agua se encuentra en el subsuelo y hace parte del proceso de la extracción de hidrocarburo; y “debido a que el agua está casi siempre presente en el proceso, es usual que el crudo salga del pozo acompañado entre otras cosas por cierta cantidad de agua, dando lugar al llamado corte de agua. Este corte de agua puede ser muy grande, superando en proporción al propio petróleo, sobre todo en yacimientos con gran historia de producción”. (Möller, et al., 2011), por lo cual nunca se ha tenido en cuenta como una generación de aportes de nutrientes que ayuden a mejorar la calidad de la tierra en el desarrollo de la agricultura doméstica y comercial, pero “la captura de una cierta cantidad de agua de formación también es de utilidad, ya que las propiedades del agua contienen información que puede ser utilizada para incidir significativamente en la rentabilidad de los campos petroleros”. (Oilfield Review, 2011), esto permitiendo a

la industria organizar sus líneas de manejo y control del agua de formación de una manera que sea utilizada y no desperdiciada, o en el peor de los casos, que se vuelva otro contaminante vertido a la tierra; y esta agua se ha tenido en cuenta debido a los cambios climáticos tan rápidos que sufre el planeta Tierra, aminorando la brecha entre los componentes naturales y las enfermedades que afectan a la agricultura que consigo traen estos cambios, que cada vez es más difícil controlar los procesos naturales de cultivo y desarrollo en la industria de la agricultura, dejando en duda la certeza de la obtención de nutrientes y vitaminas de manera natural.

Las tecnologías utilizadas en la industria petrolera que ayudan al tratamiento del agua de yacimiento, que luego pueden ser aprovechadas en la industria de la agricultura permite una disminución de volúmenes de aguas contaminadas por minerales salinos en superficie y menos consumo de materia prima para su tratamiento por parte de la industria petrolera y, así mismo, generar nuevas tecnologías con los estudios realizados a su estructura molecular y compuestos químicos en pro de la utilización del agua de yacimiento en diversas industrias que necesiten crecimiento en el ámbito de la flora para su provecho económico, social y ambiental.

La finalidad del presente documento es analizar y describir algunas de las tecnologías de tratamiento del agua de yacimiento para uso en la industria de la agricultura, comparar sus técnicas de tratamiento y evidenciar sus diferencias, las cuales nos permite seleccionar la más acorde a las necesidades de tratamiento del agua y en factores económicos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar las tecnologías de tratamiento de agua de producción para uso en la agricultura a escala industrial.

Objetivos Específicos

- Especificar el proceso de extracción del agua del yacimiento y su aprovechamiento.
- Describir las tecnologías de tratamiento de agua de producción para uso en la agricultura.
- Seleccionar el proceso más adecuado para la aplicación de tecnología en el tratamiento del agua de yacimiento para su uso en la agricultura.

1. MARCO REFERENCIAL

En esta sección se describen algunas de las tecnologías utilizadas actualmente para el tratamiento del agua de producción petrolera con fines de aprovechamiento en la agricultura, permitiendo la revalorización del recurso hídrico y disminuyendo los volúmenes de agua destinadas a vertimientos.

1.1. Agua de formación.

Es común que, por debajo de cierta profundidad de la superficie terrestre, todas las rocas que tiene porosidad están llenas de algún fluido que generalmente es agua y, por ende, es allí donde se asientan los hidrocarburos después de su formación y posterior desplazamiento. Para un mejor conocimiento de este fluido presente en las rocas porosas, se tratará a continuación el agua de formación a manera general.

1.2. Concepto.

En la industria de los hidrocarburos se tiene grandes volúmenes de agua asociadas a sus procesos productivos, debido a que el agua es un fluido que se encuentra asociado a las acumulaciones de petróleo. Su composición varía por las características químicas y físicas que muestra el agua del yacimiento al ambiente geológico en el que se encuentren, por lo que dispone de análisis que permiten identificar las características del agua, que pueden depender de la composición química, temperatura, gravedad específica, pH y presión, donde el agua puede presentar contenido de sólidos disueltos, sólidos suspendidos, materiales inertes o gases, bacterias y aceite residual (Landinez, 2020).

El agua de yacimiento hace parte de los tres fluidos que son extraídos de las operaciones de perforación, producción y otros trabajos que se le realizan al yacimiento. El agua de formación o yacimiento usualmente es la misma que el agua de formación geológica, la cual se encuentra en el momento que es perforada una barrera de reservorio.

1.3. Formas de obtención.

El agua se encuentra casi siempre en el proceso de extracción del crudo, por lo que es usual que el hidrocarburo salga del pozo acompañado por una cantidad de agua y otros fluidos de yacimiento, siendo llamado esta cantidad volumétrica, corte de agua. “Este corte de agua puede ser muy grande, superando en proporción al propio petróleo, sobre todo en yacimientos con gran historia de producción, usualmente bajo extracción secundaria.” (Barceló, et al., 2014).

También se le nombra como agua producida, que se pueden encontrar en tres condiciones: libre, emulsionada y disuelta.

- Agua libre: es aquella agua que tiene forma de gotas relativamente grandes, lo cual logra hacer fácil la separación del crudo por gravedad en tranques con flujos lentos y libres de turbulencia.
- Agua emulsionada: se encuentra en forma de gotas más pequeñas, que hacen más difícil la separación del agua del crudo en las mismas condiciones de gravedad, tomando horas y quizás días para realizar este proceso.
- Agua disuelta: este tipo de agua se considera no separable, pero no influye en la calidad del crudo por su escasa cantidad presente.

En los procesos de inyección (mejoramiento del recobro del crudo) de algún fluido al yacimiento diferente o igual que se encuentra presente en este, lograr generar un movimiento de agua y gas, por lo cual se comienza a ver aumentos de volúmenes de agua, esta es otra forma que se produce el agua de formación.

1.4.1. Propiedades

Durante cualquier proceso de trabajo o intervención que se le realice al yacimiento, se obtendrá algún tipo de fluido que traerá propiedades que se deben tratar para evitar una contaminación o una afectación de gravedad al medio que se está interviniendo, y por ende en la industria petrolera “la producción imprevista de agua, especialmente si contiene impurezas indeseadas, puede reducir significativamente el valor de un activo hidrocarburo. Además, puede acelerar el daño de los equipos e incrementar los costos de manipulación y eliminación del agua” (Abdou, et al., 2011), por eso es importante saber que propiedades químicas y físicas contiene el agua que es extraída de la formación, para así mismo saber la manera correcta y menos costosa de tratarla.

Los compuestos orgánicos presentes en las aguas de formación contienen un representativo valor numérico que es de alto potencial contaminante, entre los que destacan fenoles, éteres e hidrocarburos, tales como benceno, tolueno, xileno y poliaromáticos, entre otros; y la mayor parte de ellas están catalogadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y por la Unión Europea como sustancias prioritarias a tratar y eliminar de las aguas, dadas sus características carcinogénicas, mutagénicas y teratogénicas. (Rubio-Clemente, et al., 2014).

También se puede deducir un modelo dinámico de los yacimientos, la cuantificación de las reservas y el cálculo económico de los costos operativos a través del análisis del agua de formación, permitiendo una planificación del desarrollo de campos petroleros evitando tener gastos a futuro.

Teniendo en cuenta que las propiedades del agua de formación no serán iguales entre yacimientos, y menos dentro del mismo yacimiento, por lo que depende del ambiente depositacional, la mineralogía del yacimiento, su historia de presión y temperatura que son parámetros de gran importancia para un análisis confiable, y el influjo o la migración de fluidos y, asimismo, la interacción entre el agua y la roca, hacen variar las propiedades a lo largo del tiempo que se encuentren en contacto.

La salinidad es otra propiedad química que se encuentra presente en el agua de formación, que al igual que los componentes enunciados anteriormente debe ser tratada para evitar contaminación o alteración del medio ambiente, y en la Figura 1., podremos ver un amplio rango de salinidades presente en el agua.

Figura 1.

Tipo de agua con valores de Salinidad (parte por mil)

Tipo de agua	Salinidad, partes por mil
Agua fluvial promedio	0,11
Agua de mar	35
Sistemas evaporíticos	35 a 350
Agua de formación	7 a 270

^ **Variaciones de la salinidad.** La salinidad del agua connata varía con el ambiente depositacional; se incrementa del agua dulce de los ríos al agua de mar y los sistemas evaporíticos salobres. El agua de formación, que es el resultado de la mezcla de agua y de otros procesos físicos y químicos, presenta un amplio rango de salinidades. (Datos de Warren, referencia 2.)

Nota: Valor del agua de formación. 2011

“El agua también puede contener gases disueltos, tales como el dióxido de carbono [CO₂] y el ácido sulfhídrico [H₂S], el nitrógeno, los ácidos orgánicos, las bacterias sulfato-reductoras, los sólidos disueltos y suspendidos, y las trazas de compuestos de hidrocarburos.” (Abdou, et al., 2011).

Para lograr una identificación de agua presente en el reservorio es crucial evaluar la resistividad del yacimiento que permite evidenciar las diferentes zonas que contienen agua de las que acompañan al hidrocarburo, todo esto gracias a la salinidad contenida en el agua de formación. Este estudio se puede realizar por el método petrofísico común que utiliza los registros eléctricos en combinación con registros de porosidad, también

los registros de densidad y porosidad de neutrones, lo cual nos identifica las posibles zonas que contienen hidrocarburos y el tipo de fluido contenido en ella. A través de este método se logra identificar de manera positiva la zona con agua de modo que el intervalo con hidrocarburo pueda evaluarse adecuadamente con respecto al tipo y la cantidad de volumen de crudo presente. (Kyi, et al., 2012).

“En los sistemas de agua, varios tipos de partículas orgánicas que ocurren naturalmente adoptan una carga negativa y la presencia de carga superficial en una partícula influyen ampliamente en su estabilidad relativa. La ciencia detrás de la estabilidad coloidal y la eficacia de los procesos de coagulación y floculación, dependen ampliamente de las propiedades de hidratación y los estados de carga superficial de un coloide, y en la Tabla 1, se puede identificar según la clase los contaminantes que puedan estar en el agua.” (Ramírez & Jaramillo, 2015)

Tabla 1.

Contaminantes del agua

Clase	Ejemplos
Sólidos suspendidos	Materiales coloidales, polvo, óxidos de metales insolubles, e hidróxidos
Orgánicos disueltos	Químicos orgánicos sintéticos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos
Iónicos disueltos (sales)	Metales pesados, sílice, arsénico, nitrato, cloruros, carbonatos
Microorganismos	Bacterias, virus, quistes protozoarios, hongos, algas, células de levadura
Gases	Sulfuro de hidrógeno, metano, radón, bióxido de carbono

Nota. Agentes Naturales como Alternativa para el tratamiento del agua. 2015.

1.4.2. Tratamiento del agua de formación

Al extraer el agua de la formación, se deben cumplir con unos parámetros de alta calidad en su uso dentro y fuera de la industria petrolera, y así mismo, para poder proteger el ambiente, lo cual se logra a través de diversos tratamientos a los que es sometida el agua que llega a superficie.

“El agua obtenida de pozos productores de petróleo generalmente se encuentran con gotas de crudo debido a la mezcla de las dos fases en presencia de un agente emulsificador. El agua emulsionada con crudo puede causar graves problemas ambientales. Por lo tanto, es necesario tratar estas emulsiones antes de su descarga.” (Martínez, et al., 2013).

1.4.3. Sistema de Recogida de Aceite

Al terminar el proceso de perforación en un pozo, se comienza con la fase de producción para poder mover el aceite y/o gas del yacimiento hasta el tanque de almacenamiento o líneas directa de venta, y este movimiento del aceite y/o gas se daa través del Sistema Integral de Producción (SIP).

“El SIP es el conjunto de elementos que transportan los fluidos del yacimiento hacia la superficie, los separa en aceite, agua y gas, según sea el caso, para posteriormente enviarlos a las instalaciones de almacenamiento y comercialización. Está conformado por 3 subsistemas.” (Cruz, J.I., 2019).

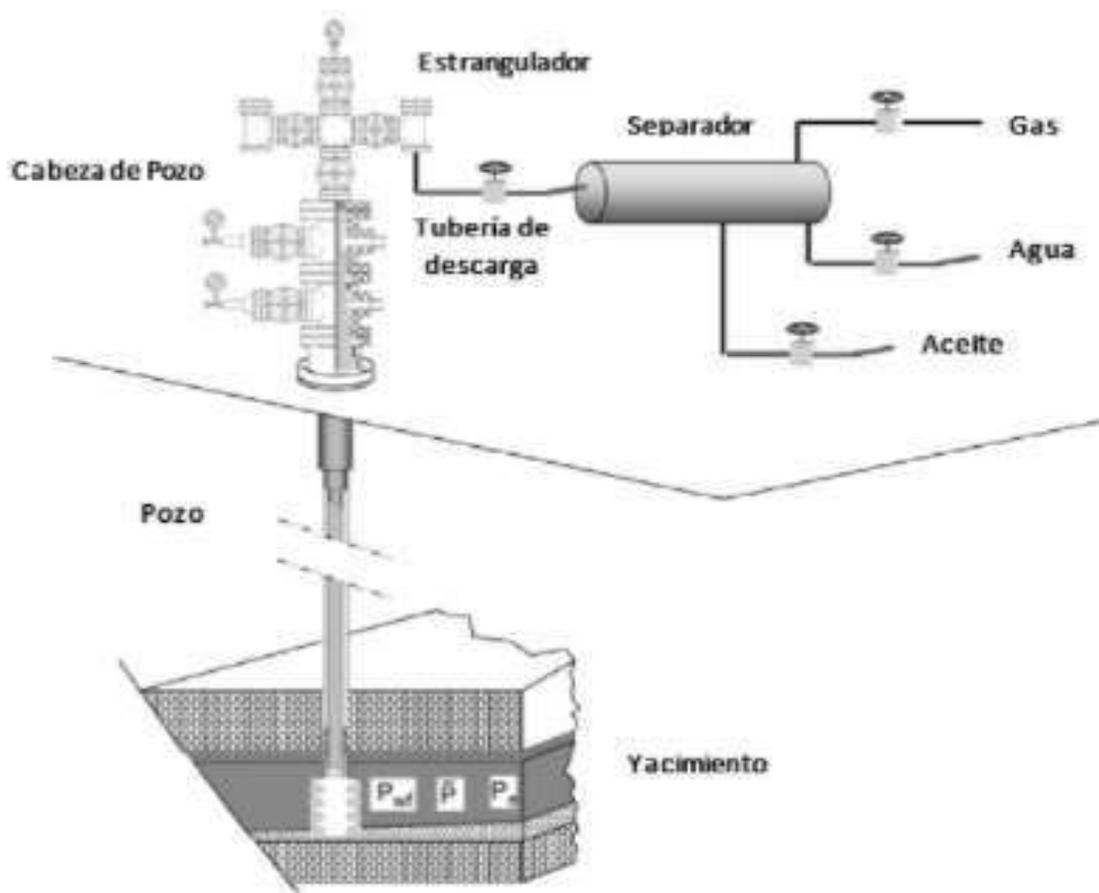
- **Yacimiento.** Es la porción de una trampa geológica que contiene hidrocarburos, la cual, se comporta como un sistema intercomunicado hidráulicamente. Los hidrocarburos que ocupan los poros de la roca que los almacena, se encuentran a alta presión y temperatura, debido a la profundidad que se localiza la zona productora. (Cruz, J.I., 2019).

- **Pozo.** Es un agujero que se hace a través de la roca hasta llegar al yacimiento, en este agujero se instalan sistemas de tuberías y otros elementos, con la finalidad de tener control del flujo de fluidos entre la formación productora y la superficie. (Cruz, J.I., 2019).
- **Equipos superficiales.** Son la infraestructura para la recolección, separación, tratamiento, procesamiento, almacenamiento y distribución de los fluidos producidos desde la cabeza de pozo hasta los puntos de venta y/o refinerías. Dentro de estos, se encuentran los siguientes:
 - **Estrangulador,** es un dispositivo que se instala en los pozos productores con el fin de establecer un control en el flujo de fluido, es decir, mediante el control de la caída de presión se permite obtener un gasto, prevenir la conificación de agua, producción de arena y, sobre todo, ofrecer seguridad a las instalaciones superficiales.
 - **Tubería de descarga,** son estructuras de acero, cuya finalidad es transportar los fluidos aportados por el yacimiento. Para poder contar con bajos costos de transporte se debe seleccionar el diámetro óptimo de la tubería para la capacidad dada.
 - **Separadores,** equipo utilizado para separar la mezcla de aceite y gas, y en algunos casos aceite, gas y agua que provienen directamente de los pozos.
- **Tanque de almacenamiento,** es un recipiente de gran capacidad capaz de almacenar la producción de fluidos de uno o varios pozos. Estos pueden ser estructuras cilíndricas de acero instalados en tierra firme, o buque-tanques utilizados en pozos localizados costa afuera. (Cruz, 2019).

En la figura 2., se logra ver cada parte del sistema de producción de hidrocarburos y como irían puestos en el pozo y tener una idea más clara del proceso de separación de los fluidos.

Figura 2.

Esquema de un sistema de producción de hidrocarburos.



Nota. Modificado de Guo, B. (2011). Sistema Integral de Producción. Cruz, J.I. (2019).

1.4.4. Parámetros de coagulación y floculación.

Los floculantes según Yin, et al. (2009), son aquellos materiales que se utilizan en las rápidas separaciones sólido-líquido a través de un proceso de agregación de partículas coloidales, cuyo proceso es denominado floculación. Estos floculantes se pueden dividir en inorgánicos tales como el aluminio, férricos o policloruro de aluminio; y orgánicos sintéticos, tales como derivados de poliacrilamida.

La coagulación definida por términos de termodinámica, depende de varios factores,

tales como el pH, temperatura, velocidad de corte y concentración relativas de coagulantes, ayuda de coagulante, y floculante. (Ramírez & Jaramillo, 2015).

- Coagulantes Utilizados a Nivel Mundial.

“El proceso de coagulación reduce la carga negativa, contribuyendo a la agregación de partículas para formar micro flóculos. La floculación consiste en la agregación de partículas para formar flóculos más grandes.” (Ramírez & Jaramillo, 2015).

La precipitación de sólidos genera sedimentación, junto con sólidos debido a la contaminación y los sólidos generados por los químicos.

A continuación, se indican los pasos para un proceso de coagulación floculante:

1. Mezclado rápido o mezclado flash. Un ajuste de pH a la sustancia se añade a la muestra de agua para efectuar una mezcla rápida, con el objetivo de lograr una dispersión de los químicos en el agua, reduciendo las fuerzas repulsivas entre las partículas, es decir permitir la coagulación.
2. Mezclado lento. La velocidad es moderada para el mezclado, logrando como objetivo mantener los componentes de agua mezclados y promover la formación de flóculos largos, es decir floculación.
3. Sedimentación. El mezclado se hace de manera suspendida, para desarrollar la precipitación del floculante.

Para el proceso de coagulación-floculación se utilizan dos clases de materiales:

- Coagulantes inorgánicos y orgánicos.
- ✓ Aditivos minerales (sales de calcio).

- ✓ Sales metálicas (cloruro férrico o sulfato de aluminio).
- ✓ Metales pre-hidrolizados (policloruro de aluminio)
- ✓ Polielectrolitos o coagulantes per se.

- Floculantes orgánicos que incluyen:
 - ✓ Polielectrolitos catiónicos y aniónicos.
 - ✓ Polímeros no iónicos.
 - ✓ Polímeros anfotericos e hidrofóbicamente modificados.
 - Floculantes naturales (almidón, goma guar, taninos, alginatos, entre otros).(Ramírez & Jaramillo, 2015)

- Coagulante natural: Semillas de Moringa oleífera.

“Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación. Algunos poseen propiedades antimicrobianas. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano y la biodegradabilidad de los lodos producidos, permitiendo su utilización en la agricultura.” (Rondón, et al., 2017).

Las semillas de Moringa oleífera tienen una alta confiabilidad en tratamiento del agua para uso en la agricultura y no afectan al medio ambiente, dado de que no son tóxicas, no afectan el pH, ni la conductividad del agua, y el lodo obtenido por la coagulación es inocuo y poco voluminoso, siendo estas también proteínas catiónicas, lo cual permite esto un proceso de purificación de agua y que sea una opción muy atractiva por su bajo costo en los países de desarrollo; y al contener proteínas catiónicas las semillas de Moringa, esto permite un mecanismo de tratamiento de agua que predomina la coagulación en forma de adsorción y neutralización de cargas. (Rondón, et al., 2017).Y antes de poder realizar cualquier tratamiento al agua de producción de formación en superficie se debe evaluar el estado sanitario a la cual se encuentra y las propiedades

físicas y químicas que contenga; por eso es aconsejable que su calidad se determine de acuerdo a los siguientes criterios:

- Contenido de metales pesados.
- Contenido de sustancias tóxicas para el tratamiento.
- Condiciones de oxígeno.
- Grado de eutrofización (concentración de compuestos nitrosos y de fósforo).
- Valor de pH.
- Contaminación microbiológica.

Según el tipo de sustancias nocivas que puede contener el agua residual y entrar en cuerpo de agua se clasifican en cuatro categorías de peligro:

- Extremadamente peligrosos (mercurio, benz(a)pireno, dicloroetileno, etc.).
- Altamente peligrosos (aluminio, boro, molibdeno, plomo, nitritos, fluoruros, poliacrilamida, benceno, hidracina, tetracloruro de carbono, etc.).
- Peligrosos (vanadio, hierro, cobre, níquel, cromo, zinc, polifosfatos, nitratos, etc.).
- Moderadamente peligrosos (cloruros, sulfatos y otros).

Al seguir con el proceso de clasificación y manejo de aguas de yacimiento, es necesario tener un mayor conocimiento del alcance de contaminación de las aguas superficiales debido a la entrada de descargas, por lo cual, se debe evaluar los niveles de peligro que se subdividen en las siguientes zonas: zona de desastre ambiental, zona de situación ambiental de emergencia y zona de situación satisfactoria. Las zonas mencionadas anteriormente están relacionadas a sustancias tóxicas, que también se acumulan en los sedimentos del fondo y en los órganos y tejidos de las hidrobiotas. (Figura 3). (Kopylov & Ochkov, 2010)

Figura 3.

Criterios utilizados para evaluar el alcance de la contaminación de las aguas superficiales.

Indicador	Zona de		
	Desastre ambiental	Situación de emergencia	Situación satisfactoria
Llave indicadora			
sustancias químicas perteneciente a categorías de peligro:			
1-2, MAC	> 10	5-10	1
3-4, MAC	> 100	50-100	1
Indicadores adicionales			
pH	5,0-5,6	5,7-6,5	-
consumo químico de oxígeno, mgO ₂ / dm ³	20-30	10-20	-
disuelto O ₂ , % de saturación*:	10-20	20-50	-
nitritos, MAC	> 10	> 5	<1
nitratos, AC	> 20	> 10	<1
sales de amonio	> 10	> 5	<1
fosfatos, MAC	> 0,6	0,3-0,6	<0,05
mineralización, en fracciones de un nivel regional	3-5	2-3	Regional nivel

* El contenido de oxígeno disuelto en agua pura es de 8 mg / dm³ en verano, de 12 a 11 mg / dm³ en invierno, la saturación es del 80%.

Figura 3. (Continuación)

Indicador	Zona de		
	Desastre ambiental	Situación de emergencia	Situación satisfactoria
Indicadores clave			
contenido de contaminantes (nitritos, fenoles, metales pesados, petroleumproducts, surfactants), MAC	> 100	10-100	3-5
contenido de cloro compuestos ganicos, MAC	> 3	1-3	<1
contenido de carcinogens, benz (a) pireno, MAC	> 3	1-3	<1
mineralización, g / dm ³	> 100	10/100	<3
área contaminada, km ²	> 3	3-5	<0,5
Indicador adicional			
oxígeno disuelto, mg / dm ³	<1	4-1	> 4

Nota. Conceptos modernos de protección de cuerpos de agua y mejora de las tecnologías de tratamiento de agua. 2010.

2. TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE YACIMIENTO

En la actualidad el agua es un recurso natural importante para la humanidad y un aporte de gran valor para el ambiente, que cubre más del 70% de la superficie del planeta, teniendo propiedades únicas que la hacen esencial para la vida. Teniendo en cuenta que el agua se agota poco a poco con el pasar de los días, debido al mal uso, a la contaminación que ocurre en ríos, océanos y lagos, se ha generado tecnologías que se logran aplicar para obtener un aprovechamiento total del agua de producción de yacimientos siendo esta una de las fuentes de obtención de agua contaminada por compuestos químicos que el ambiente no trata y descompone por sí mismo, y tampoco sería de utilidad para el ser humano. Es por ello que en esta sección se nombraran algunas tecnologías utilizadas en la actualidad para el tratamiento de agua de producción de yacimientos.

2.1. Membranas nanocompuestas.

Las tecnologías de membrana han surgido en los últimos años como técnicas de separación más eficientes desde el punto de vista energético y medioambiental que otros procesos de separación. Dentro de las tecnologías de membrana, la nanofiltración (con tamaño de retención de hasta 2 nm) ha adquirido una gran relevancia para su aplicación tanto en medio acuoso como no acuoso gracias a las ventajas que ofrece frente a otros procesos de separación más convencionales como la destilación o la osmosis inversa. (Pasetta, 2019).

En la actualidad se utilizan membranas poliméricas para varias aplicaciones de tratamiento de agua, incluyendo las corrientes de aguas residuales de productos agroalimentarios, industria del petróleo y eliminación de contaminantes de agua potable, y por lo general tienen como objetivo disminuir los contaminantes presentes en las aguas residuales. En procesos de membranas impulsadas por presión, como la microfiltración

(MF), la ultrafiltración (UF), se usan como alternativas para eliminación de grandes cantidades de macro contaminantes orgánicos; mientras que la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO) tienen una alta eficiencia en retirar micro contaminantes. (Castro, 2020).

Por lo general, en la fabricación de las membranas de nanocompuestos se usan nanomateriales en un material polimérico macroscópico, permitiendo esto un recubrimiento sobre la superficie de la membrana o una dispersión en la solución de polímero antes de la colada de la membrana, logrando que los materiales dispersos, generalmente conocidos como rellenos, puedan incrustarse en el matiz polimérico obteniendo membranas de polímero nanocompuesto a las que también se les conoce como membranas de matriz mixta.(Castro, 2020).

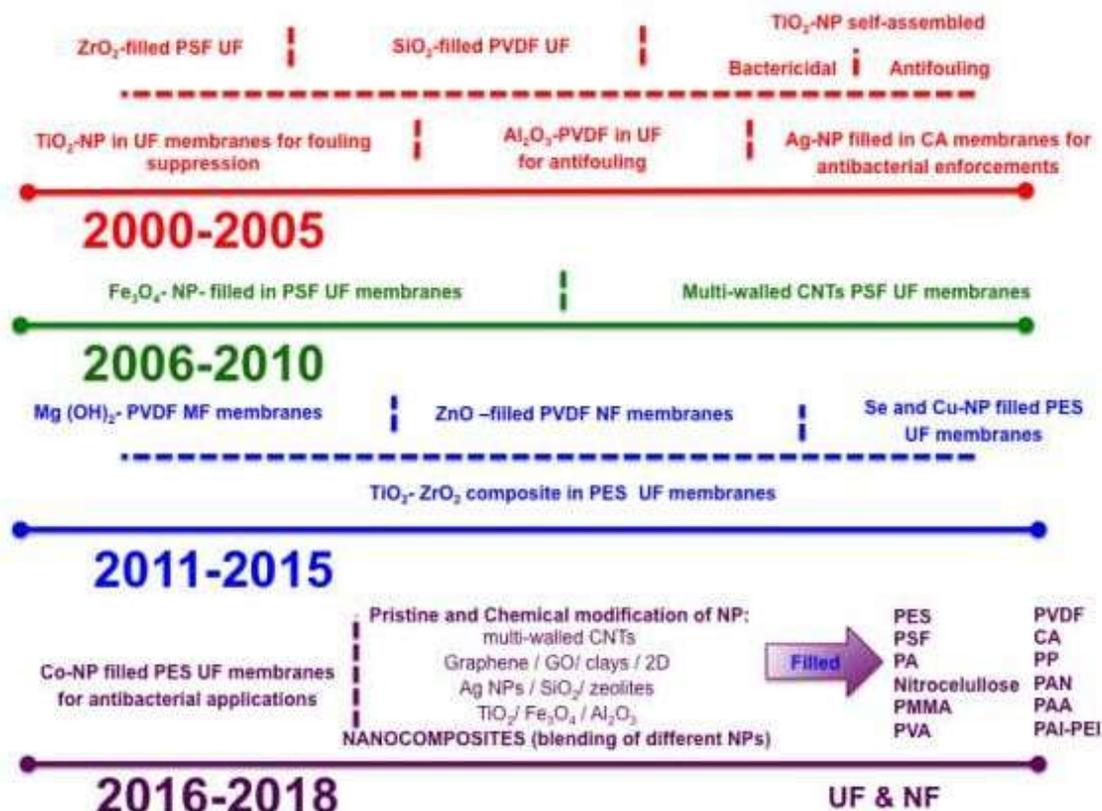
Con el uso de las membranas se permite una alternativa potencial para enfrentar varios desafíos, como:

- Mejorar el rendimiento en términos de permeabilidad y selectividad.
- Mejorar la hidrofilia, evitando la acumulación de contaminantes e incrustaciones.
- Mejorar la eficiencia de rechazo.
- Mejorar las propiedades térmicas y mecánicas.

En la figura 4., se puede observar una descripción a nivel general del progreso y los avances en el campo de las membranas.

Figura 4.

Visión general sobre el progreso de las membranas nanocompuestas.



Nota. La estrategia de nanomateriales en membranas poliméricas para tratamiento de aguas en Membranas nanocompuestas. 2020.

Un claro ejemplo del progreso de las membranas, es que “las membranas basadas en nanomateriales han demostrado tener poca suciedad al agregar partículas inorgánicas.” (Castro, 2020).

Durante el desarrollo de las membranas nanocompuestas, se han proporcionado diferentes de tipos de nanomateriales como la plata (Ag), titanio (TiO_2), zinc (ZnO), óxido de cobre (CuO), nanotubos de carbono (CNT), óxido de grafeno (GO), aluminio (Al_2O_3), silicio (SiO_3), hierro (Fe_3O_4), cobalto (Co), circonio (ZrO_2), nanopartículas de arcilla y zeolitas. (Castro, 2020). Y gracias a estos nanomateriales, las membranas tendrían un uso fundamental para el tratamiento del agua potable siendo utilizados como filtros de

membrana.

Debido al desarrollo que se están generando en las membranas compuestas gracias al uso de nanomateriales en la actualidad, lo cual permite una implementación para realizar depuración y desalación de agua o tratamiento de aguas residuales. Esto se da gracias a las propiedades específicas basadas en sus estructuras.

2.2. Colorantes mediante fotocátalisis con TiO_2 usando luz artificial y solar

“La fotocátalisis con TiO_2 en suspensión ha demostrado ser eficiente en la oxidación de sustancias por medio de fotoactivación del catalizador con luz artificial. El uso de la luz solar en el proceso reduce los costos de operación en una aplicación a escala real de estos residuos.” (Losada, et al., 2017).

El desarrollo de la aplicación de la fotocátalisis con TiO_2 a colorantes, fármacos, fenoles, pesticidas y compuestos organoclorados ha demostrado buenos resultados en los cuales se logra evidenciar que el contaminante es transformado hasta CO_2 y H_2O (mineralizado). Durante este proceso se aprovecha especies altamente oxidantes como el radical hidroxilo ($+OH$) para eliminar las sustancias problemáticas.

“Cuando la luz con energía $> 3.20eV$ (o longitud de onda $< 380\text{ nm}$) ilumina el semiconductor TiO_2 (dióxido de titanio), ocurre la excitación de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción. El hueco generado oxida el agua (o el anión hidróxido) para producir el radical hidroxilo. De otro lado, los electrones pueden reaccionar con el oxígeno disuelto formando anión radical superóxido, el cual evoluciona hacia radicales hidroxilos, perhidroxilo o peróxido de hidrógeno, los cuales también pueden oxidar los contaminantes.” (Losada, et al., 2017).

El proceso de foto degradación de contaminantes presentes en el agua se desarrolla económicamente viable, es cuando se utiliza la luz solar y en particular en aplicaciones a gran escala, obteniendo esto también un valor ambiental adicional significativo y logrando

convertirse en una técnica sostenible.

Las sustancias que normalmente son utilizadas para este proceso son recalcitrantes que se usan en los laboratorios como indicadores y/o agentes complejantes, los cuales son los colorantes aniónicos como el rojo congo (RC), el naranja de metilo (NM) y el negro de eriocromo T (NET), que son de carácter ácido, altamente solubles en agua y poco oxidables por tratamientos convencionales; realizando una mezcla de estas tres sustancias como un modelo ARC (aguas residuales coloreadas) se usan para tratamiento mediante el proceso foto-catalítico con TiO_2 (Losada, et al., 2017).

2.3. Efecto de amplitud y pulso en ultrasonidos de baja frecuencia

“El ultrasonido se caracteriza por la generación de ondas acústicas, que requieren de un medio para propagarse a una velocidad características de la naturaleza de la onda y del medio a través del cual se propaga. Por lo general, las ondas ultrasónicas se clasifican de acuerdo al límite de audición humana por frecuencia (20 kHz).” (Cabrera, et al., 2016). Se tienen en cuenta ciertos parámetros para realizar el ultrasonido, los cuales son la frecuencia, que hace referencia al número de ciclos completados por la onda por unidad de tiempo ($f = 1/T$), y la intensidad, que es la energía promedio transmitida a través de la unidad de área la cual es perpendicular a la dirección de propagación de ondas ($I = (PA^2) / 2\rho C$), donde I corresponde a la intensidad acústica (W / m^2), PA es la presión máxima (atm), ρ es la densidad (kg/m^3), y c es la velocidad de onda en el medio (m/s). La potencia acústica es la energía total irradiada por una fuente por unidad de tiempo ($W = IS$), donde S representa el área radiante de la superficie (m^2), y W es la potencia acústica (W). (Cabrera, et al., 2016).

En el proceso de ultrasonido se generan efectos de frecuencia, los cuales son:

- Alta potencia (frecuencia >20 kHz). Esto se logra con una propagación de onda a través de materiales de diferente naturaleza, originando compresiones y descompresiones en la estructura molecular del medio de propagación que generan

el fenómeno de la cavitación acústica, desarrollando altas temperaturas y presiones en el medio, donde la cavitación causa el rápido crecimiento de burbujas, llevándolas al colapso.

- Baja frecuencia y alta potencia (<20 kHz). Este efecto de frecuencia genera cambios en las propiedades físicas y químicas en los alimentos, por lo cual es conocida en la industria alimentaria, y gracias a que en diferentes aplicaciones del ultrasonido en matrices alimenticias se realizaron estudios, que dieron como resultado la emulsificación, el efecto antiespumante, la inactivación microbiológica, la extracción, el cambio de color, la oxidación lipídica, entre otras.

Es por ello que las aplicaciones de ultrasonido de potencia se examinan para ser utilizadas como tecnologías emergentes y siendo esta una tecnología verde que ofrece un gran potencial para diversificados procesos. “Uno de los usos principales del ultrasonido de alta potencia es la aplicación en el diseño de emulsiones con una cantidad mínima de surfactante, en el que el efecto depende de las características de la matriz sobre la que se aplica. Por ejemplo, en el caso de dos líquidos inmiscibles, una burbuja colapsa cerca del límite de fase del líquido, la onda de choque resultante puede proporcionar una mezcla muy eficaz de las capas, haciendo que requieran menos tensoactivos y produciendo emulsiones, con tamaños de gota más pequeños dentro de una distribución de tamaños, es decir, produciendo micro o mano emulsiones, en comparación con otros métodos.” (Cabrera, et al., 2016).

2.4. Eliminación biológica del nitrógeno

El contaminante nitrógeno es uno de los más importantes a tratar de las aguas residuales, debido a que se produce en variedad de formas y estados de oxidación, y una parte importante de este nitrógeno llega en diversos cuerpos de agua en forma de amonio, nitrito y nitrato, generando problemas de toxicidad en la flora y fauna acuáticas, y en el ser humano disminuye la concentración de oxígeno disuelto (OD), eutrofización y otros diferentes problemas que afectan a la salud, como la metahemoglobinemia,

también conocida llamado síndrome de baby blue. (Zoppas, et al., 2016).

“Existe un porcentaje significativo del nitrógeno global en forma de nitrógeno gaseoso, que no está disponible para la biota terrestre. El suministro y el ciclo ambiental de las formas disponibles de este elemento dependen en gran medida de la descomposición biológica del nitrógeno presente en los componentes acumulados dentro de la biota. En las aguas, el nitrógeno está presente en cuatro formas: nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrito y nitrato.” (Zoppas, et al., 2016). Teniendo en cuenta el daño ambiental y a la salud del ser humano que genera el nitrógeno en diferentes formas de estado gaseoso o líquido, existen alternativas tecnológicas para el tratamiento biológico del nitrógeno desarrollando el ciclo bioquímico del nitrógeno, que se apoya en dos procesos, la nitrificación y la desnitrificación. Para el proceso de nitrificación se divide en fases, donde la primera fase, es absorbido el amonio por las bacterias oxidantes de amonio, y la fase posterior es consumido el nitrito por las bacterias oxidantes de nitrito, dejando como resultado final nitrato, esto se genera en condiciones aeróbicas; dado que, en condiciones anóxicas, las bacterias heterotróficas convierten el amonio oxidado en gas nitrógeno. (Zoppas, et al., 2016).

- Nitrificación.

Es la primera etapa del proceso biológico para la eliminación de nitrógeno, oxidando el amoníaco a nitrito y el nitrito se oxida a nitrato. Este proceso se realiza gracias a la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal por el AOB Y NOB, ya que este grupo de bacterias se caracteriza por generar su energía para crecer a través de la oxidación de compuestos inorgánicos. Este proceso está limitado por la concentración de OD y la temperatura, y también por estar inhibido por la concentración de amoníaco y ácido nitroso. (Zoppas, et al., 2016).

- Desnitrificación.

La desnitrificación hace referencia a la eliminación biológica del nitrato del óxido nítrico,

el óxido nitroso y el gas nitrógeno, siendo este un proceso de respiración anóxico, realizado por bacterias heterótrofas.

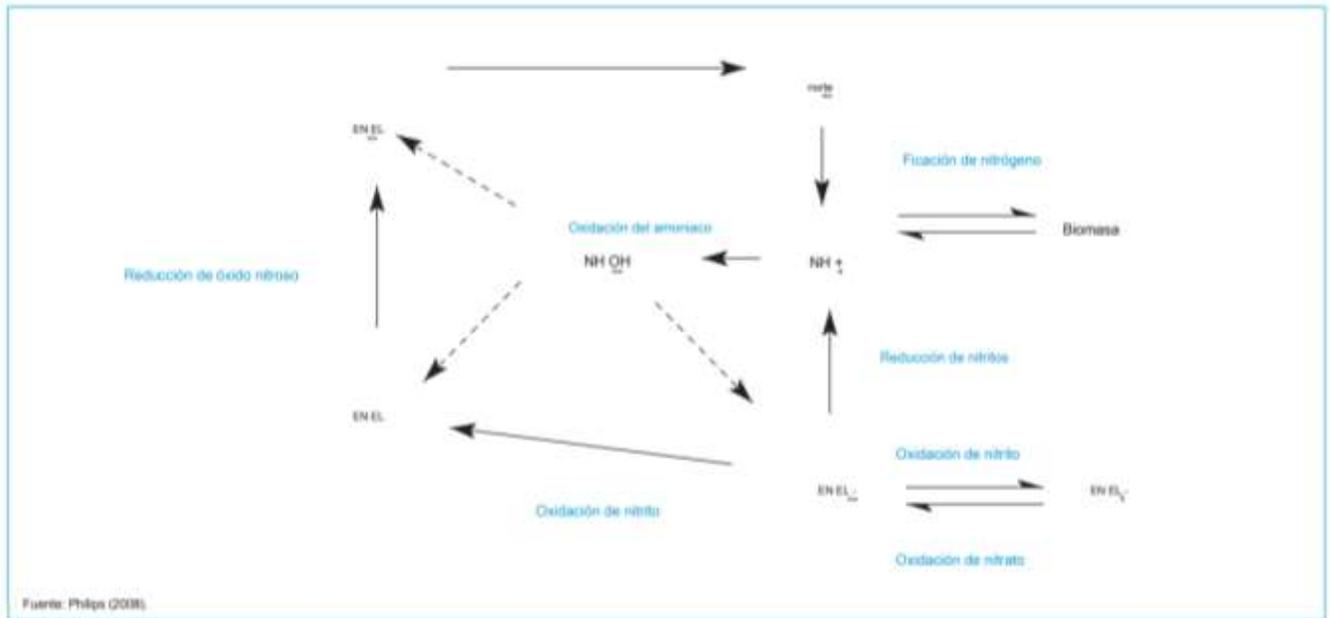
“En el proceso de desnitrificación, el oxidante de nitrato se reduce a nitrógeno molecular, con la transferencia de cinco electrones por átomo de nitrógeno. Se observa que, de los ocho electrones liberados por el nitrógeno amoniacal en su oxidación a nitrato, solo cinco se recuperan cuando el nitrato se reduce a nitrógeno molecular. Por tanto, en términos de equivalencia de oximetría, el nitrato tiene una capacidad de oxidación igual a una fracción de $5/8$ de oxígeno requerida para la nitrificación. En otras palabras, una fracción de $5/8 = 0.625$ del consumo de oxígeno por nitrificación puede recuperarse como “equivalente de oxígeno” en el proceso de desnitrificación.” (Zoppas, et al., 2016).

También se puede inferir que la capacidad de desnitrificar tiene una relación con la cantidad de sustrato biodegradable presente.

En la siguiente figura 5., se evidencia las interconversiones biológicas del nitrógeno, demostrando que inicialmente el nitrógeno gaseoso en el aire se reduce en el suelo o en el agua gracias al amoníaco por fijación bacteriana.

Figura 5.

Representación esquemática de las reacciones implicadas en el ciclo biológico del nitrógeno.



Nota. Parámetros operativos en la remoción biológica de nitrógeno de las aguas por nitrificación y desnitrificación simultáneas. 2016.

2.5. Nanopartículas

“Nanotecnología es un término genérico y en evolución que comprende el desarrollo de muchos productos y procesos, con la característica común de la escala manométrica. Esta escala va desde 1 nm hasta los 100 nm. Para que una partícula pertenezca a esta escala debe tener dimensiones manométricas en las de una de sus dimensiones. Usualmente las nanopartículas poseen dimensiones manométricas en sus tres dimensiones, mientras que los términos “material nanoestructurado” y “nanomaterial” son más generales y se aplican a materiales cuya fabricación, o cuyas dimensiones sean controladas a nivel manométrico.” (Medina, et al., 2015). Existen tres tipos de nanopartículas:

- Las naturales. Se producen en erupciones volcánicas.
- Las incidentales. Son las emisiones de la combustión en motores.
- Las fabricadas. Son las que se generan con una finalidad.

La nanotecnología tiene la capacidad de tratar el agua a través de filtros porosos de una escala manométrica, la cual puede generar una eliminación del 100% de virus y bacterias; y la utilización de una tecnología de separación eléctrica que logra atraer los iones a laminas especiales, logra eliminar sales y metales pesados. (Medina, et al., 2015).

A continuación, se indica algunas de las aplicaciones más significativas de diferentes tipos de nanopartículas.

Figura 6.

Aplicaciones de diferentes tipos de Nanopartículas (NPs).

APLICACIÓN	TIPO DE NANOPARTÍCULA
POTENCIA/ENERGÍA	
<i>Células Solares sensibilizadas por Colorante</i>	TiO ₂ es el más empleado, ZnO y Au
<i>Almacenamiento de Hidrógeno</i>	Nanopartículas Híbridas Metálicas
<i>Mejora de los materiales para Ánodo y Cátodo para Pilas de Combustible</i>	Nanoarcillas, CNTs y NPs en CNTs
<i>Catalizadores Ambientales</i>	TiO ₂ , Cerio
<i>Catalizadores para Vehículos</i>	NPs Cerámicas Óxidos Metálicos (Cerio, Zirconio) y Metales (Pt, Rh, Pd y Ru)
SALUD/MEDICINA	
<i>Promotores de crecimiento óseo</i>	Hidroxiapatita (HAp) Cerámica
<i>Los Protectores Solares</i>	ZnO y TiO ₂
<i>Apósitos para heridas antibacterianos</i>	Ag
<i>Fungicidas</i>	Nanopartículas Cu ₂ O
<i>Biomarcaje y detección</i>	Nanopartículas de Plata y Coloides de Oro
<i>Agentes de contraste de MRI</i>	Óxidos de Hierro ultrapequeños: Fe ₃ O ₄ y Fe ₂ O ₃

Figura 6. (Continuación)

INGENIERÍA	
<i>Herramientas para cortar</i>	ZrO ₂ y Al ₂ O ₃ , Cerámicos No-Óxidos (WC, TaC, TiC) y Co
<i>Sensores Químicos</i>	Diversas NPs válidas, depende de la aplicación
<i>Resistentes al Desgaste / Recubrimientos resistentes a la abrasión</i>	Nanopartículas de Alúmina y Y-Zr ₂ O ₃
<i>Nanoarcilla Polímero reforzado con Materiales Compuestos</i>	Organoarcillas (<i>Sepiolite, Laponite y Smectite</i>). Silicagels y POSS
<i>Pigmentos</i>	Pb, Zn, Mg y Ag. Otras NPs Metálicas incluyendo ViO, AlO, CdO y otras
<i>Tintas: Conductores, Magnéticos, etc (utilizando polvos de metal)</i>	Buenos conductores como la Plata
<i>Mejora estructural y física de Polímeros y Materiales Compuestos</i>	Nanoarcillas, NanoÓxidos y NanoHidróxidos de Metales. Montmorillonita modificada orgánicamente, TiO ₂ , Y ₂ O ₃ o SiO ₂
UTENSILIOS DE CONSUMO	
<i>Barrera de embalaje utilizando Silicatos</i>	Nanoarcillas, en particular Bentonita y Kaolinita
<i>Vidrio autolimpiable</i>	TiO ₂
MEDIO AMBIENTE	
<i>Tratamientos de agua (Foto-Catálisis)</i>	Cerámicas Óxidos Metálicos, TiO ₂

Nota. Las nanopartículas y el medio ambiente. 2015.

2.6. Desalinización electroquímica.

“La tecnología de desalinización más popular en el mercado es la ósmosis inversa (RO), que empuja el agua a través de membranas semipermeables a presiones de hasta 1000 psi y crea agua de baja salinidad (<500 mg / L). Las membranas de ósmosis inversa son susceptibles de hincharse y dañarse en aceites y solventes, así como ensuciarse en presencia de otros orgánicos. Es posible eliminar los hidrocarburos mediante un tratamiento previo, pero esto puede tener un costo prohibitivo.” (Sparrow, et al., 2018).

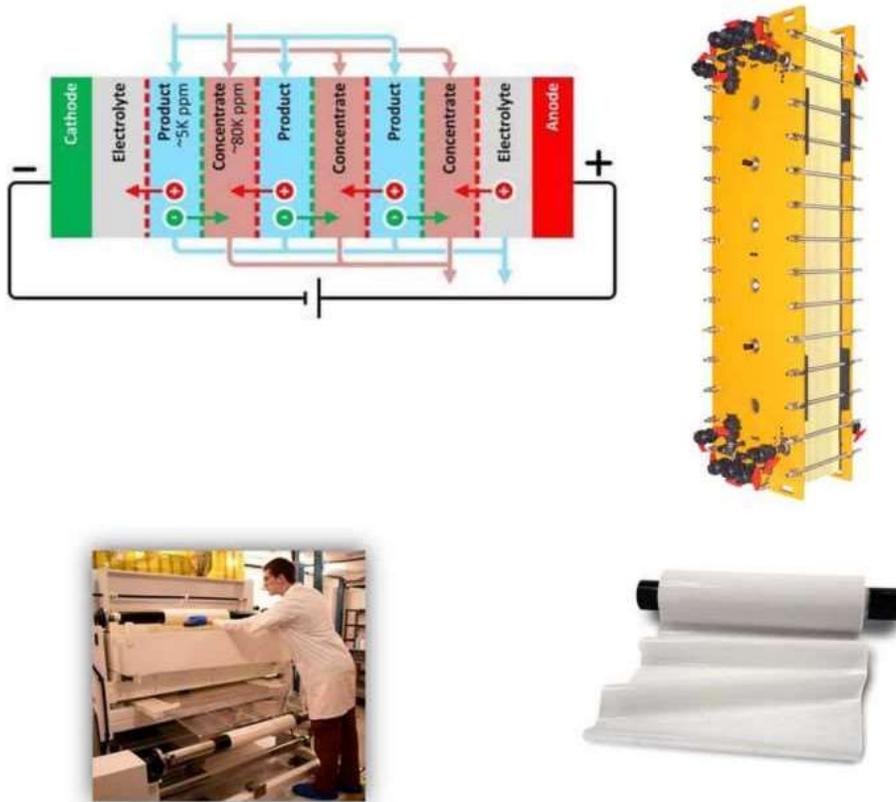
La desalinización electroquímica que se describe en esta sección, es la reversión de electrodiálisis no presurizada (EDR) que implica tecnología de membrana, la cual evita el uso de la diferencia de presión de a través de **las membranas**, por lo cual no se contribuye al ensuciamiento en un sistema de ósmosis inversa; y este proceso se realiza aplicando electricidad a través de las membranas que generan un intercambio iónico

para separar iones por cargas. También existe las membranas EDR **convencionales**, pero tienen problemas como hinchazón y fallan en presencia de aguas residuales aceitosas. (Sparrow, et al., 2018).

En la siguiente Figura 7., se observa el sistema EDR a gran escala y su configuración, también la membrana y su forma de producción.

Figura 7.

Diagrama que muestra una configuración simplificada del sistema EDR (arriba a la izquierda), pila de EDR a gran escala (arriba a la derecha), producción de membranas (abajo a la izquierda) y membrana (abajo a la derecha).



Nota. Un sistema electroquímico avanzado para la desalinización de agua producida por EOR y el consumo reducido de polímeros. 2018.

2.7. Material organofílico hinchable

“El vidrio hinchable puede hincharse reversiblemente hasta 8 veces su volumen seco en presencia de líquidos orgánicos. El vidrio hinchable no se hincha con el agua, pero es muy eficaz para eliminar una amplia gama de sustancias orgánicas disueltas del agua. Los compuestos de sorbato varían desde especies polares como alcoholes, ácidos carboxílicos y tensoactivos no iónicos hasta especies no polares como tolueno, benceno, etilbenceno y decano. El proceso de hinchamiento es completamente reversible cuando las especies absorbidas se evaporan calentando el material”. (Edmiston, et al., 2011).

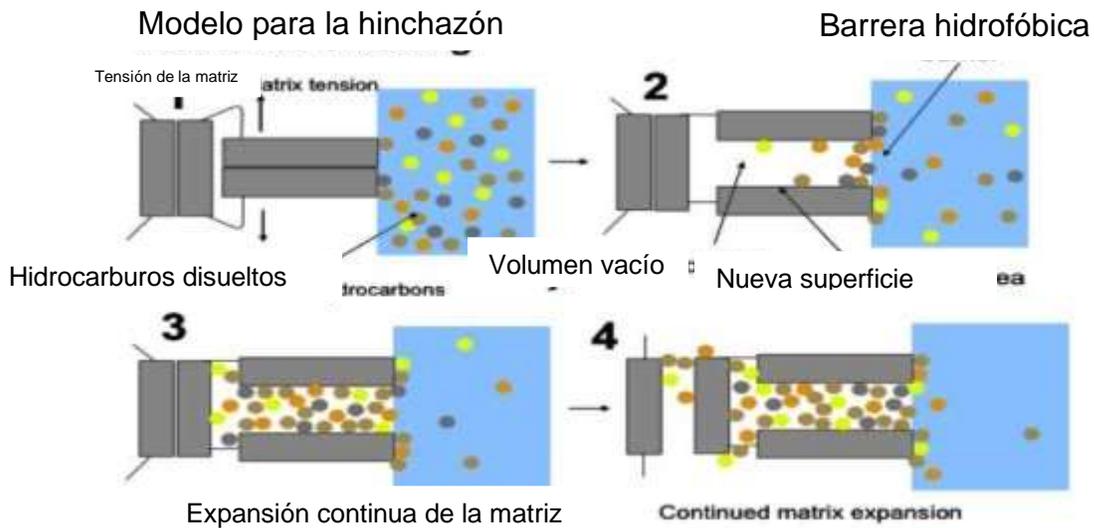
La morfología de la estructura del vidrio hinchable consiste en partículas de sílice unidas logrando una matriz flexible que tiene diámetros en la escala manométrica, permitiendo un hinchamiento por las fuerzas de tracción generadas por el colapso inducido por capilaridad de la matriz polimérica nanoporosa que se incurre en el secado; pero se liberan posteriormente las fuerzas de tracción si las interacciones no covalentes que mantienen al polímero comprimido en un estado seco se genera un problema de interrupción por absorber. A través de un comportamiento de absorción dinámica desarrolla una animación de la matriz absorbente que conduce a una captura no selectiva de orgánicos y quedándose en aporte en atribuciones a la fisisorción, Una vez realizado el proceso de absorción de una cantidad particular de especie objetivo, “desengancha” la matriz para inducir un volumen vacío que se utilizara en absorción posteriores, atrayendo aún más el objetivo hacia los poros abiertos. Y con la relajación de la matriz hasta el estado expandido, es decir, la configuración inicial del estado del gel antes del secado, genera una nueva superficie y volumen para moléculas de muy pequeño tamaño que puedan penetrar los nanoporos. (Edmiston, et al., 2011).

El proceso de la absorción de orgánicos disueltos por medio de vidrio hinchable se muestra a continuación en la figura 8., donde la imagen 1 es la adsorción inicial a la superficie de material; la imagen 2, se produce una adsorción suficiente para desencadenar la expansión de la matriz que conduce a la absorción a través de la frontera entre el sorbente y el agua; en la imagen 3, se logra observar el relleno de poros

que conduce a una mayor percolación en la matriz nanoporosa; y por último, la imagen 4 muestra la expansión continua de la matriz aumenta el volumen vacío disponible.

Figura 8.

Modelo propuesto de la absorción de orgánicos disueltos por medio de vidrio hinchable.



Nota. Tratamiento de agua de retorno de flujo utilizando medios organosílicos hinchables. 2011.

Para poros de tamaño nanométrico de la matriz en expansión se permite la entrada de compuestos orgánicos y polímeros disueltos en la matriz, gracias a que son lo suficientemente grande para dejar entrar estos compuestos, pero no lo necesariamente pequeños para obstaculizar el paso de las partículas de roca u otros sólidos que entren a la matriz.

3. PROCESO SELECCIONADO PARA LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE YACIMIENTO PARA SU USO EN LA AGRICULTURA

La tecnología para el tratamiento del agua de producción de hidrocarburos seleccionado es membranas compuestas, teniendo en cuenta la información investigada, la cual está presente en el documento, que nos indica que las membranas son las más eficientes y amigables con el medio ambiente para los procesos de separación del agua y los contaminantes, permitiendo que las partículas de agua obtenidas en la producción de yacimiento al finalizar el proceso de tratamiento estén lo menos contaminadas de hidrocarburos y los componentes químicos que contengan.

Además, el uso de membranas compuestas en el proceso nombrado, permite que en la actualidad se utilicen membranas poliméricas para varias aplicaciones de tratamiento de agua, dando alternativas de la eliminación de grandes cantidades de contaminantes orgánicos de tamaños macro y micro que, comparado con las otras tecnologías descritas, abarca más contaminantes que estén presentes en el agua y un mayor porcentaje de potabilidad (> 60% libre de contaminantes), lo cual genera más confianza al agricultor de que utilice el agua tratada y libre de contaminantes; aunque este proceso con tecnología de membrana compuestas no es una alternativa para tratar aguas que contengan alta cantidad de nitrógeno, debido a que no generan un proceso de nitrificación y desnitrificación, para ello se puede complementar este proceso con el de eliminación biológica del nitrógeno, ya que las aguas de producción pueden contener cantidades grandes o menores de componentes químicos como el nitrógeno, el hidrógeno y el oxígeno, que estas dos últimas conforman la molécula del agua y son las importantes a encontrar en su estructura molecular.

Con el uso de la tecnología de membranas compuestas, podemos obtener ventajas significativas en la industria, debido a que la separación se realiza de manera continua, el consumo de energías es pequeño, los procesos son fácilmente combinables con otros procesos de separación, el escalado de los procesos es sencillo, las propiedades de las

membranas son ajustables, no es preciso añadir aditivos, se recuperan productos de valor, se requieren bajos costos de inversión, y se reduce la emisión de residuos que atentan contra el medio ambiente. (Solís, y otros, 2017).

BIBLIOGRAFIA

- Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, G., Mccarthy, K., O'Keefe, M., Raghuraman, B., Xian, C. (2011). Valor del agua de formación. *Oilfield Review*, 14.
- Barceló, I., Caron, P., Larreteguy, A., Gayoso, R., Gayoso, F., & Guido, G. (2014). Modelado de procesos de separación agua-petróleo incluyendo efectos tpermicos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 1 - 29.
- Cabrera, M., Sotelo, L., & Quintanilla, M. (2016). Effect of amplitude and pulse in low frequency ultrasound on oil/water emulsions. *Dyna*, 63-68.
- Castro, R. (2020). The strategy of nanomaterials in polymeric membranes for water treatment: Nanocomposite membranes. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 410-436.
- Edmiston, P., Keener, J., Buckwald, S., Sloan, B., & Terneus, J. (2011). Flow Back Water Treatment Using Swellable Organosilica Media. *SPE*, 1-8. KOPYLOV.
- Kyi, Ko Ko; SPE; Hashim, Hazlina; Carigali, Petronas; BHD. (2012). *SPE International*, 1 - 19.
- Losada, L., Laguna, E., Osorio, E., Serna, E., & Torres, R. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocátalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar. *Producción+Limpia*, 50-60.
- Martínez, M., Bernardo, F., & Franco, C. (enero de 2013). Tratamiento de agua basado en la adsorción de crudo en nanopartículas polares y no polares. *Informador Tecnico (Colombia)*, 77(1), 10.
- Medina, M., Galvan, L., & Reyes, R. (2015). Las Nanopartículas y el medioambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 49-58.
- Ramírez, H., & Jaramillo, J. (2015). Agentes Naturales Como Alternativa Para El Tratamiento Del Agua. *Facultad Ciencias Basicas. Universidad Militar Nueva Granada*, 136-153.
- Rondón, M., Díaz, Y., Rodríguez, S., Guerra, B., Fernández, E., & Tabio, D. (2017). Empleo de semillas de Moringa oleífera en el tratamiento de residuales líquidos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 87-101.
- Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2014). Aplicación del proceso Fenton en

- el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad.*, 211 - 223.
- Ochkov S., & V. F. (2010). Modern Concepts of Protecting Water Bodies and Improvement of Water Treatment Technologies. *Teploenergetika.*,332-335.
- Solis, C.A., Vélez, C.A., & RAMÍREZ NAVAS, J.S. (2017). Membrane technology: Ultrafiltration. *Entre ciencia e Ingeniería 11.* (22).
- Sparrow, B., Ebsary, A., Mandel, D., Man, M., & Technologies., S. (2018). An Advanced Electrochemical System for EOR Produced Water Desalinationand Reduced Plymer Consumption. *SPE*, 1-11.
- Zoppas, F., Mora, A., & Meneguzzi, A. (2016). Parâmetros operacionais naremoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Engenharia Sanitaria e Ambiental.*, 29-42.