

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Aplicabilidad de la nanotecnología enfocada a la estimulación de las arenas productoras del Oriente Ecuatoriano.

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

#### **Ingeniero en Petróleo**

Presentado por:

Ronny David Morales García

Kevin de Jesús Saltos Pazmiño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, ya que siempre han sido un pilar fundamental durante mis estudios y sin ellos no hubiese podido lograr esta meta.

A mis compañeros de carrera, por todo el apoyo que supieron brindarme en los temas complicados.

A mis profesores, porque siempre tuvieron la mejor manera de motivarnos a aprender.

Y a todas mis amistades que supieron creer en mi incentivándome a siempre seguir adelante.

Kevin Saltos Pazmiño.

## DEDICATORIA

Este trabajo final es dedicado especialmente a mi madre, quien ha sido mis fuerzas desde que nací y mi motivación para nunca rendirme en la vida. A mi amada novia, quien me acompaña en cada paso que doy hacia nuestro futuro, brindándome siempre su ternura, cariño y sabiduría.

A mis hermanos; apoyo y guías en mi carrera universitaria y ejemplos a seguir en el transcurso de toda mi vida.

A todo lector y empresa que requiera información para ejecutar proyectos más ambiciosos y visionarios que permitan el progreso tanto individual como colectivo de nuestra sociedad.

Ronny Morales García.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por haberme permitido realizar mis estudios de grado sin inconvenientes y por saber adaptarse a la nueva modalidad de estudio que todos tuvimos que pasar; y a todos los profesores, en especial a los de la Facultad de Ciencias de la Tierra, por brindarme todos los conocimientos necesarios para emprender mi vida profesional.

Un agradecimiento especial para los profesores que me sirvieron de tutores de tesis, Xavier Vargas, Danilo Arcentales y Fernando Sagnay por todo el apoyo en la realización de la investigación.

Kevin Saltos Pazmiño.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi madre por brindarme la herencia del estudio, a mi novia por las largas noches de apoyo y paciencia en mis responsabilidades y a mis hermanos que me ayudaron en distintas situaciones a lo largo de mi carrera universitaria.

Y un agradecimiento en general a todos mis maestros de la facultad, quienes han dedicado parte de su vida para darme la mejor formación tanto como profesional como ser humano, en especial a los maestros Danilo Arcentales, Xavier Vargas y Fernando Sagnay que nos brindaron sus conocimientos y experiencia para poder avanzar en nuestro proyecto.

Ronny Morales García.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Ronny David Morales García* y *Kevin de Jesús Saltos Pazmiño* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

Ronny David Morales  
García

---

Kevin de Jesús Saltos  
Pazmiño

# EVALUADORES

---

**MSc. Fernando Sagnay Sares**

Profesor de la materia

---

**MSc. Xavier Vargas Gutiérrez**

Profesor Tutor

## RESUMEN

El Ecuador, un país petrolero con gran potencial económico en su subsuelo sufre del retraso tecnológico respecto al uso de herramientas innovadoras en la industria petrolera como consecuencia de la falta de visión y carencia de experiencia en campo por parte de las empresas petroleras encargadas de la producción nacional de petróleo; debido a esto, se propone el aprovechamiento y aplicación de la nanotecnología en los trabajos de estimulación de pozos de crudo en la Amazonía nacional mediante la recopilación de información que avale su incursión en proyectos de mayor envergadura dentro del territorio nacional.

Para ello, se realizó una investigación bibliográfica a autores alrededor del mundo que permitió enfocar las ventajas y desventajas, procesos e impactos dirigidas al contexto nacional de la incursión de la nanotecnología en fluidos de estimulación.

Dentro de los estudios revisados se detalló que los nanofluidos de estimulación potencian parámetros físicos claves como la penetración en la arena productora, alteración de la humectabilidad de la roca, estabilización de la viscosidad, disminución del filtrado del lodo, aumento del factor de recobro y además funcionan como agente cementante para formaciones no consolidadas; junto con ello la reducción del 50% de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, la reducción del porcentaje de Agua y Sedimentos y el incremento de producción.

Como consecuencia se determina que la incursión de nuevas tecnologías es de gran beneficio para los procesos de estimulación de pozos en el oriente ecuatoriano y será la herramienta que revolucione la industria petrolera ecuatoriana.

**Palabras Clave:** Nanotecnología, Estimulación, Nanofluidos, Producción.



## **ABSTRACT**

*Ecuador, an oil country with great economic potential in its subsoil, suffers from technological lag regarding the use of innovative tools in the oil industry as a consequence of the lack of vision and lack of experience in the field by the oil companies in charge of production of national oil; due to this, the use and application of nanotechnology is proposed in the work of stimulating oil wells in the national Amazon by gathering information that supports its incursion into larger projects within the national territory.*

*For this, a bibliographic research was carried out with authors around the world that allowed to focus the advantages and disadvantages, processes and impacts concentrated on the national context of the incursion of nanotechnology in stimulation fluids.*

*Within the reviewed studies, it was detailed that stimulation nanofluids enhance key physical parameters such as penetration into the producing sands, alteration of rock wettability, stabilization of viscosity, reduction of mud filtering, increase of recovery factor and also they function as a cementing agent for unconsolidated formations; together with this, the 50% reduction of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere, the reduction of the percentage of Water and Sediments and the increase in production. Consequently, it is determined that the incursion of new technologies is of great benefit for the well stimulation processes in eastern Ecuador and will be the tool that will revolutionize the Ecuadorian oil industry.*

*Keywords: Nanotechnology, Stimulation, Nanofluids, Production.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Descripción del problema .....	2
1.2    Justificación del problema .....	3
1.3    Objetivos .....	3
1.3.1    Objetivo General .....	3
1.3.2    Objetivos Específicos .....	3
1.4    Marco teórico.....	4
1.4.1    Conceptos Generales .....	4
1.4.2    Revisión bibliográfica .....	5
CAPÍTULO 2 .....	12
2.    Metodología .....	12
2.1    Características de la Investigación .....	12
2.2    Diseño de producto .....	13
2.3    Formulación de alternativas.....	14
2.4    Descripción y selección de alternativa .....	14
2.5    Selección de la mejor alternativa de nanomateriales .....	16

2.6	Marco legal .....	16
2.6.1	Normativa a nivel mundial sobre el uso de nanotecnologías .....	16
2.6.2	Normativas locales sobre el uso de nanotecnologías .....	17
CAPÍTULO 3 .....		18
3.	Resultados y análisis .....	18
3.1	Indicaciones para trabajos de estimulación .....	18
3.1.1	Estimulación ácida en carbonatos .....	18
3.1.2	Arenas no consolidadas .....	19
3.2	Beneficios del uso de nanopartículas en la estimulación de pozos .....	20
3.2.1	Beneficios en la penetración .....	22
3.2.2	Beneficios de nanopartículas de óxido de zinc y óxido de magnesio ....	23
3.2.3	Beneficios en la alteración de humectabilidad .....	23
3.2.4	Beneficios del óxido de silicio .....	25
3.2.5	Beneficios del Nano sílice .....	25
3.3	Inconvenientes del uso de nanotecnología en las operaciones petroleras...	27
3.4	Impactos generados .....	28
3.4.1	Impacto Ambiental .....	28
3.4.2	Impacto Productivo .....	31
3.4.3	Impacto Económico .....	31
CAPÍTULO 4 .....		32
4.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	32
4.1	Conclusiones .....	32
4.2	Recomendaciones .....	33
BIBLIOGRAFÍA .....		35

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FR	Factor de Recobro
EOR	Enhanced Oil Recovery (Recuperación Mejorada de Petróleo)
API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
HPHT	High Pressure High Temperature (Alta Presión y Alta Temperatura)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Normalización)
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Estándares.
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización

## SIMBOLOGÍA

VES	Viscoelastic Surfactants (Surfactantes viscoelásticos)
LNF	Liquid Nanofluid (Nanofluido Líquido)
ESN	Emulsion System with Nanoparticles (Sistema de emulsión con nanopartículas)
MEA	Microencapsulated Acid (Ácido microencapsulado)
BPPD	Barriles de petróleo por día
BSW	Basic Sediment and Water (Agua libre y sedimentos)
nm	Nanómetro
Wt	Relación al peso
Nps	Nanopartículas
Al	Aluminio
O	Oxígeno
Mg	Magnesio
Fe	Hierro
Ni	Níquel
Zn	Zinc
Zr	Zirconio
Sn	Estaño
Si	Silicio
H	Hidrógeno
Cl	Cloro
C	Carbono
Br	Bromo
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados Celsius
gal	Galón
lbm	Libras masa
lpg	Libras por galón
lpb	Libras por barril
mPa	Milipascal

s	Segundo
psi	Pound per square inch (Libra por pulgada cuadrada)

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Comparación de la escala nanométrica. (Gaiaciencia, 2015) .....	5
Figura 1.2 Porcentaje de reducción de daño para diferentes muestras. (Salem, 2015) .....	6
Figura 1.3 Pérdida de filtrado para diferentes concentraciones. (Salem, 2015) .....	6
Figura 1.4 Uso de diferentes nanofluidos elaborados con agua destilada para EOR. (Egolo et al., 2012) .....	10
Figura 2.1 Tipos de estimulación de pozos. (Morales y Saltos, 2021) .....	14
Figura 3.1 Micrografía de partículas de arena no tratadas y tratadas con nanopartículas catiónicas. (Kalgaonkar & Chang, 2017).....	19
Figura 3.2 Efecto de nano ZnO en la viscosidad del VES. (Al-muntasheri et al., 2016) .....	23
Figura 3.3 Medida del ángulo de contacto de gota de keroseno en superficie mojada por petróleo sumergido en diferentes concentraciones de nanopartículas. (Yuan et al., 2019) .....	24
Figura 3.4 Invasión de agua dentro de un micro modelo saturado al petróleo con afinidad a hidrocarburos a diferentes concentraciones de LNF. (Yuan et al., 2019) .	24
Figura 3.5 Efectos de gota de salmuera con (ESN) y sin nanopartículas sobre superficie de vidrio. (Sergeev et al., 2019).....	25
Figura 3.6 Variación de ángulo de contacto de roca oleofílica antes y después del filtrado. ....	26
Figura 3.7 Conductividad de la fractura en limonita Indiana. (Singh et al., 2018).....	26
Figura 3.8 Conductividad de la fractura de arcillas Eagle Ford antes y después del tratamiento con MEA. (Singh et al., 2018) .....	27
Figura 3.9 Volumen acumulado de dióxido de carbono producido en ausencia de nano catalizadores tri-metálicos. Elaborado por (Hashemi et al., 2014), editado por (Morales y Saltos, 2021) .....	29
Figura 3.10 Volumen acumulado de dióxido de carbono producido en presencia de nano catalizadores tri-metálicos. Elaborado por (Hashemi et al., 2014), editado por (Morales y Saltos, 2021).....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Guía para la selección de la estimulación matricial de acuerdo con el daño de formación. (Silva, 1991) .....	15
Tabla 3.1 Indicaciones en el uso de nanomateriales. (Morales y Saltos, 2021) .....	18
Tabla 3.2 Beneficios generales de diferentes nanopartículas en trabajos de pozos. (Morales y Saltos, 2021) .....	21
Tabla 3.3 Parámetros potenciados. (Morales y Saltos, 2021) .....	21



# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

El Ecuador es un país petrolero y su principal fuente de ingreso de divisas es la comercialización del crudo extraído de su territorio, nuestra nación ha aprovechado la demanda energética de la sociedad actual para beneficiarse económica y localmente desde la década de 1970 cuando surgió el “boom petrolero” hasta la actualidad (Almeida Allen, 2020). Pese a ello, la capacidad productora del país no está siendo utilizada a su máximo índice por lo que se requiere de procesos que permitan aumentarla.

Con este propósito en mente, la ingeniería ha indagado en los campos de la nanotecnología para incluirla en las actividades petroleras, logrando de esta forma obtener amplios beneficios como, por ejemplo: la creación de materiales más resistentes, fluidos con mejores propiedades para el uso en los pozos, detección de hidrocarburos en el subsuelo, entre otros procesos que han observado mayores ventajas con la aplicación de estas nuevas herramientas (Fakoya, M. F., & Shah, S. N., 2017).

Nuestro proyecto hace énfasis en los beneficios que la nanotecnología provee en la estimulación de las arenas productoras del oriente de nuestro país con el objetivo de mejorar sus capacidades y obtener mayores beneficios económicos tanto para las empresas privadas como públicas, mediante la descripción y guía de información sobre sus principios, metodologías y resultados aplicados al contexto ecuatoriano enfocados al lavado de la arena y procesos de acidificación.

En el primer capítulo se mencionan las razones, motivaciones y conceptos que ayudarán al lector a entender las primicias y objetivos de nuestra investigación, además de la aclaración del problema que sufre la economía nacional al no hacer uso de las capacidades totales de producción de su subsuelo.

En el segundo capítulo se explica la metodología utilizada, las técnicas empleadas para la recolección de la información registrada en este trabajo y la descripción de nuestra propuesta para solucionar el problema planteado previamente.

Dentro del tercer capítulo se discuten y proyectan los diferentes resultados acerca de los beneficios, inconvenientes, guías e impactos acerca del uso de nanotecnología aplicada a la Industria Petrolera encontrados en la literatura y, por último, en el cuarto capítulo se da a conocer las conclusiones del proyecto junto con recomendaciones dirigidas al lector y a la empresa que hará uso de este trabajo.

## **1.1 Descripción del problema**

Dentro del desarrollo de las actividades hidrocarburíferas existen procedimientos que de uno u otro modo provocan daños a las arenas productoras ocasionando el taponamiento parcial o completo de los conductos por donde fluye el petróleo. Estos daños afectan las propiedades físicas de la roca, en especial la permeabilidad de la misma que se ve disminuida por los residuos de cemento y cañones en la cara de la arena, y además, por la migración de finos en las etapas de producción que se acumulan progresivamente.

Con el objetivo de solucionar este problema, las empresas cuentan con una amplia variedad de opciones de trabajos de reacondicionamiento, entre estas opciones existe la estimulación de las arenas del subsuelo mediante el uso de distintos químicos y surfactantes cuyos principios y efectos son conocidos desde hace décadas por parte de los responsables de llevar a cabo dichas acciones.

Para infortunio de las compañías, un gran porcentaje de estos métodos son relativamente antiguos y no existe la misma cantidad de información y datos en comparación con el uso de nuevas tecnologías que estén destinadas a trabajos de estimulación que permitan producir al máximo la capacidad productora del subsuelo ecuatoriano generando.

## **1.2 Justificación del problema**

Este trabajo se fundamenta en la necesidad que poseen las empresas petroleras de aprovechar al máximo los volúmenes de hidrocarburos en los yacimientos para poder obtener mayores utilidades al momento de la comercialización del crudo producido. Con el objetivo de lograrlo, es necesario realizar programas de recuperación de petróleo en donde la inversión inicial sea menor en comparación con los ingresos generados, por esta razón es que la estimulación de las arenas productoras es una opción atractiva debido a su bajo costo económico de implementación en comparación con métodos de recuperaciones más complejos que incluyen gastos adicionales que restarán rentabilidad al proyecto.

Al ser tecnologías recientes, no se cuenta con suficiente información y experiencia en el campo que sustenten el uso de estos métodos, por lo que se requiere de investigaciones que avalen la ejecución de los mismos, con el fin de extraer la mayor cantidad de petróleo posible del subsuelo ecuatoriano.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar los procesos y la metodología que requiere la aplicación de la nanotecnología en la estimulación de las arenas productoras de la Amazonía ecuatoriana.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Brindar información detallada sobre los parámetros que se necesita para desarrollar la estimulación de arenas mediante la aplicación de nanofluidos.
2. Detallar los beneficios e inconvenientes del uso de la nanotecnología en los procedimientos de estimulación de pozos en el oriente ecuatoriano.
3. Analizar los impactos por generarse al utilizar nanotecnología en la estimulación de pozos.

4. Comparar los diferentes nanomateriales utilizados en la estimulación de pozos para la selección del que represente mayores beneficios en futuros trabajos.

## **1.4 Marco teórico**

A continuación, se presentan los conceptos teóricos relacionados con las operaciones de estimulación de pozos y también los concernientes a nanotecnologías.

Esta sección se divide en dos partes, la primera exhibe las diferentes nociones del tema en general y la segunda, se analiza casos de estudios similares que se han desarrollado recientemente.

### **1.4.1 Conceptos Generales**

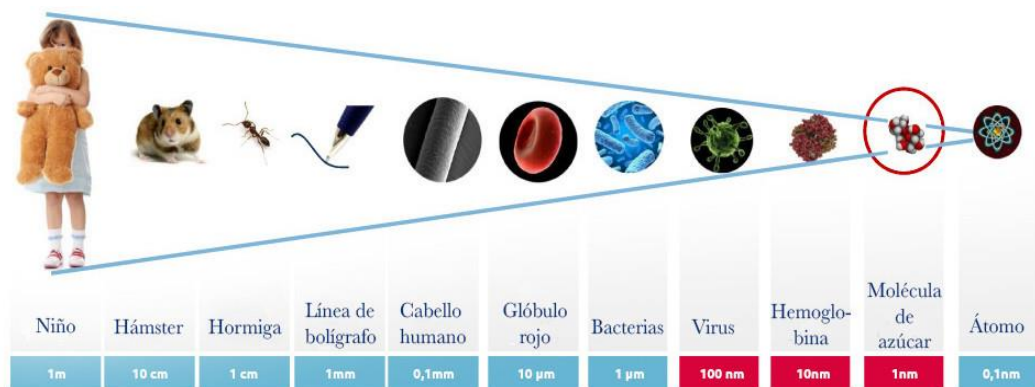
El fenómeno conocido como daño de la formación, se le denomina a cualquier alteración a las propiedades de matriz de la roca o del fluido in situ, las cuales dan como consecuencia una reducción de la permeabilidad y con ello una reducción de la productividad del pozo. La causa frecuente de estas perturbaciones de las propiedades es el contacto de la formación productora con un fluido ajeno a la misma, generándose el daño durante las actividades de perforación y completación del pozo.

La completación o terminación de pozos, consta de las operaciones que se realizan una vez forjadas todas las actividades de perforación y después de que se haya colocado y cementado el casing, de manera que se puedan empezar las pruebas de producción y se ponga en marcha la producción del pozo por primera vez. Dentro de operaciones de terminación de pozos, se acopla la sarta de producción final, por donde se controlará y aislará la producción de las diferentes arenas productoras.

Los fluidos utilizados en estas actividades se conocen como fluidos de completación. Su función principal es la de controlar las presiones para evitar

arremetidas, debe estar diseñado de tal manera, que el daño a la formación sea el mínimo posible. Por otro lado, la estimulación de pozos abarca los trabajos que se ejecutan posteriormente para reponer u optimizar la productividad de los mismos.

La nanotecnología es la ciencia que estudia los materiales a escala nanométrica (nanopartículas) y el uso de los mismos en sus diferentes ramas. A la escala de la millonésima parte de un milímetro, se conservan todas las propiedades que tienen los materiales a grado normal, además de adoptar nuevas funciones propias de este rango. Se considera nanopartículas a fragmentos de materia sólida con longitudes entre 1-100 nm, las cuales normalmente se usan como aditivos en líquidos y con ello dan origen a los nanofluidos.



**Figura 1.1 Comparación de la escala nanométrica. (Gaiaciencia, 2015)**

#### 1.4.2 Revisión bibliográfica

*Adel Salem (2015)* realizó pruebas con diferentes tamaños y concentraciones de nanopartículas de óxido de silicio con el objetivo de encontrar en cuál de ellos se obtuviesen los mejores resultados en relación a la mitigación del daño de la formación con los lodos de perforación. Los mejores resultados obtenidos se obtuvieron con tamaños de nanopartículas de 5-15 nm, los cuales redujeron la pérdida de filtrado hasta en un 40% en relación con el lodo de perforación convencional; además, con este tamaño de nanopartículas se

obtuvo que la mejor concentración para mitigar el daño fue 27 wt%, con la cual la pérdida de filtrado se redujo en un 60% aproximadamente de los valores convencionales, concluyendo que con valores superiores de concentraciones el experimento no es económicamente rentable.

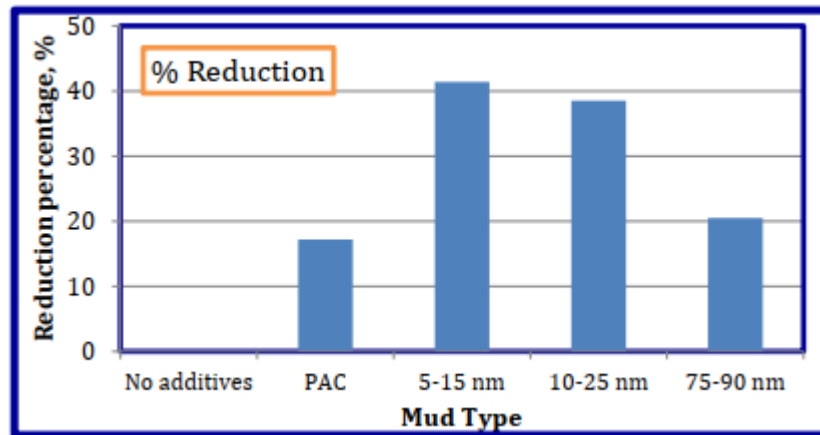


Figura 1.2 Porcentaje de reducción de daño para diferentes muestras. (Salem, 2015)

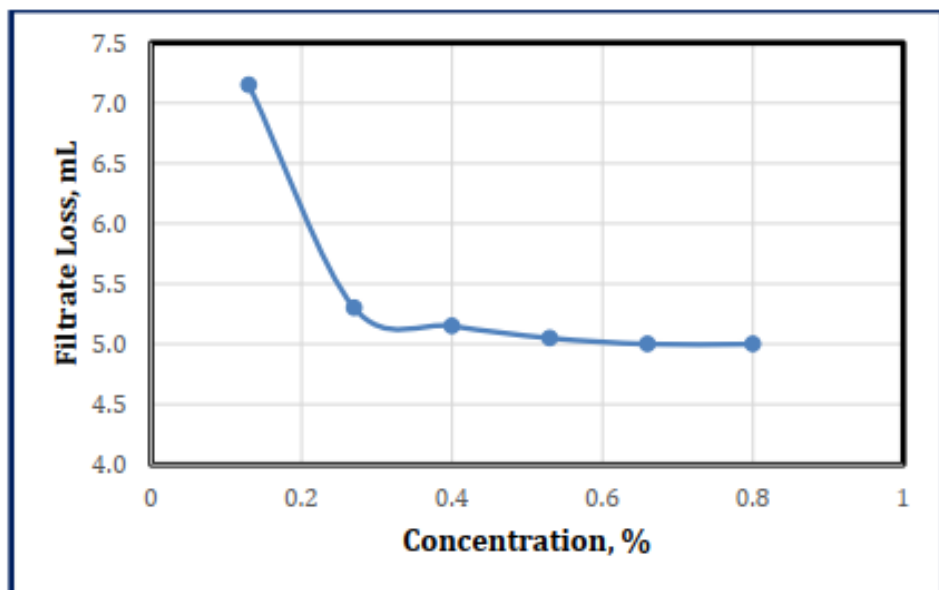


Figura 1.3 Pérdida de filtrado para diferentes concentraciones. (Salem, 2015)

*Kutty et al. (2015)* investigaron sobre el uso de nanofluidos en el mejoramiento del rendimiento de pozos. Unas de las ventajas de estas nuevas tecnologías son:

- Admite una mayor penetración del ácido en la formación en trabajos de estimulación, debido a la reducción de las tensiones superficiales e interfaciales. De este modo, el ácido reacciona con la matriz de la roca con mayor eficiencia, aumentando la producción en rangos de hasta 40%.
- Perfecciona trabajos de inyección en EOR.
- Remueve la película de aceite de la roca antes del bombeo de ácido. Concluyeron que el uso de nanofluidos es beneficioso en el mejoramiento de las longitudes de wormholes; por tanto, aumenta la producción de los pozos, además de mejorar posteriores limpiezas ácidas del pozo. (*Kutty et al., 2015*)

*Aimara (2019)* realizó un estudio sobre la implementación de nanofluidos en núcleos pertenecientes a arenas productoras del oriente ecuatoriano para aumentar su factor de recobro, donde se observó que en ambos casos el FR incrementó en cada núcleo 18,44% y 20,96% respectivamente; además de mostrar un incremento de la porosidad en una de las muestras, evidenciándose los beneficios del uso de nanopartículas en aspectos tales como, mejorar la mojabilidad de las arenas y reducir la tensión interfacial de la emulsión; factores que ayudan al desplazamiento del hidrocarburo en la recuperación mejorada.

*Sheshdeh et al. (2015)* realizaron una investigación sobre métodos de alteración de mojabilidad aplicando nanomateriales, las nanopartículas que mostraron mejores resultados fueron:

- Nano-sílice, las cuales alteraron la humectabilidad logrando que el sistema tienda a ser mojado por agua.
- Nano-poly silicona, quienes pudieron alterar el sistema tanto a hidrofílico como oleofílico dependiendo el tipo de composición de las nanopartículas de poly silicona empleada.

*Sánchez y Viveros (2018)* evaluaron el uso de nanobentonita con tamaños de 90 nm para mejorar las propiedades de los fluidos de perforación en un campo colombiano. Realizaron las pruebas con diferentes concentraciones del aditivo y los mejores resultados se obtuvieron de la mayor concentración 6 lpg, reduciendo el filtrado de lodo en pruebas API en 27% y en prueba HPHT en un 32%; además, las propiedades reológicas del nanofluido se mantuvieron estables a diferentes concentraciones, habiendo ligeros cambios para mayores concentraciones.

*Laura Valencia (2019)* probó el uso de nano sílice de diferentes tamaños (11, 49, 62 nm) y en varios tipos de lodos de distintas naturalezas (Hidrofílico: neutro, ácido y básico; hidrofóbico) para encontrar en qué variantes se obtendrían las mejores propiedades del fluido de perforación. Una vez realizadas las pruebas necesarias los resultados mostraron que las nanopartículas hidrofílicas de menor tamaño (11 nm) con superficie ácida, son quienes dan los mejores resultados en las pérdidas de filtrado y espesor de revoque de la torta de lodos, en una concentración de 100% de las mismas, manteniendo similar la reología del fluido inteligente al fluido base de campo.

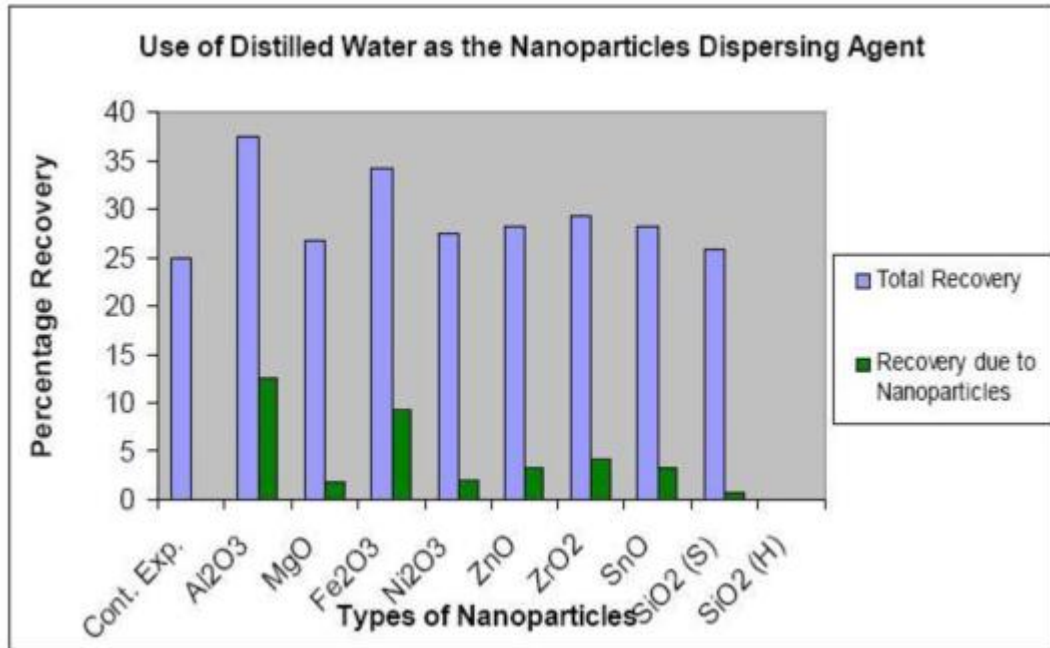
*Larco y Montesdeoca (2019)* utilizaron nanopartículas para mejorar las propiedades del fluido de completación en campos del oriente ecuatoriano durante las operaciones de reacondicionamiento de pozos. Los resultados indican que el uso del nanofluido provee varios beneficios, uno de ellos guarda relación en la zona de la interface (área donde se generan las emulsiones) manteniendo constante los valores de corte de agua de los pozos; además concluyeron que se deben estudiar las propiedades de la formación de cada pozo, para aplicar la composición óptima en los químicos a utilizar, manteniendo siempre la misma concentración de nanopartículas; además se concluyó que el uso de los fluidos inteligentes no afecta las arenas productoras de manera negativa; más bien, dado que las nanopartículas penetran mayores distancias dentro de los poros de la matriz, ayudan a limpiar



este espacio poroso lo que se ve reflejado en el aumento de la productividad de los pozos.

*Córdoba (2020)* utilizó nanografeno para optimizar los fluidos de perforación y evaluar los beneficios que se obtienen al aplicarse en el campo. Utilizó un nanofluido base agua y los resultados obtenidos en base las reducciones de filtrado fueron: 17.6% filtrado API, 22.2% filtrado HPHT y 60.34% filtrado PPT; además, llegaron a la conclusión que los mejores resultados se dan con una concentración del 1% de wt%.

*Tarek y El-Bandi (2015)* emplearon una mezcla de nanofluidos en su investigación para poder unir todos los beneficios que tienen estas nanopartículas a nivel individual. Las nanopartículas fueron: óxido de silicio 25%, óxido de aluminio 25% y óxido de hierro 40%; mezclados en una proporción de 0,01 wt de la mezcla. Los resultados obtenidos demuestran que como fluido dispersante se puede usar agua de mar ya que la salinidad de este fluido tiene efectos despreciables en los beneficios obtenidos en el aumento de recuperación de petróleo; cabe recalcar que el desarrollo de los procesos con nanofluidos se debe realizar en las etapas más tempranas de una actividad de EOR.



**Figura 1.4** Uso de diferentes nanofluidos elaborados con agua destilada para EOR. (Egolo et al., 2012)

*Hernández y Miranda (2020)* probaron diferentes concentraciones de nano sílice (0.25%, 0.5%, 1%) en dos formulaciones de lodo. Se demostró que el lodo con diferente goma xántica y mayor concentración de almidón proporciona mejores resultados tanto en reología como en las propiedades de filtrado, concluyendo también que el mismo lodo aumentó el ángulo de contacto del petróleo sobre la roca.

*Amanullah entre otros (2011)* probaron la eficacia de diferentes nanopartículas no especificadas en un fluido de perforación base agua para investigar su comportamiento. Propiedades como el comportamiento reológico dependiendo el tiempo, se mantuvieron aplicando una concentración de 0,14% wt; de modo que con una pequeña cantidad de nanopartículas se obtuvieron resultados similares al uso de gran cantidad de aditivos del lodo, lo que paso similarmente con el volumen de filtrado de lodo que se mantuvo casi constante para los 3 nanofluidos y el lodo base. El punto cedente de gel aumentó al usar los nanofluidos, lo que significa un mejor manejo de los

recortes y limpieza del pozo, trayendo consigo todos sus beneficios a la hora de perforar. Finalmente, se obtuvo un escaso contenido de sólidos en los nanofluidos, siendo de vital importancia debido a que este factor es uno de los que generan el daño de la formación, provocando caídas en el índice de productividad.

# CAPÍTULO 2

## 2. Metodología

Dentro del marco de este trabajo se propuso determinar y describir los métodos más factibles sobre los cuales se pueda implementar el uso de nanopartículas en la estimulación de las arenas productoras en el oriente ecuatoriano, además de detallar sus impactos y consecuencias en comparación con los métodos convencionales. Teniendo en cuenta una de las necesidades permanentes de la industria del petróleo y gas, la cual es extraer la mayor cantidad posible de crudo del subsuelo.

Con el fin de lograr este objetivo, se utilizó la información proporcionada por expertos a nivel global en temas relacionados con la ciencia de la nanotecnología y el petróleo; junto con los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra carrera para dirigir y enfocar esta información a un ámbito local que sea de beneficio para la economía de nuestra nación y empresas privadas que puedan emplear esta tesis en campos de similares características alrededor del mundo.

### 2.1 Características de la Investigación

Este proyecto se realizó mediante un diseño cualitativo debido a que se presentaron metodologías investigativas como soluciones alternativas detallando sus beneficios e impactos, además de resultados en relación con sus beneficios y parámetros de aplicabilidad. No se presentan datos y resultados numéricos ni resultados experimentales. Los recursos y resultados necesarios para presentar este trabajo fueron producto de investigaciones mas no de cálculos.

Además, presenta un carácter bibliográfico porque se indagó en recursos secundarios para obtener información explícita que permita presentar factores con el fin de lograr los objetivos planteados. Además, se requirió la coherencia de esta información mediante la pericia y el cotejamiento de la información por parte de los investigadores; cualquier contradicción o duda sobre la

procedencia de las fuentes fue corroborada para entregar al lector datos veraces y auténticos. Dentro de esta modalidad, se obtuvo la información de diferentes revistas académicas, libros, tesis, etc.; de donde se adquirió toda la información pertinente al tema de las nanotecnologías y la estimulación de pozos.

Se evidencia que es de tipo descriptivo debido a que se describió la metodología, procesos y principios físicos de la aplicabilidad de la nanotecnología para la estimulación de las arenas productoras en el oriente ecuatoriano junto con sus beneficios y recomendaciones. Además, se detalló los parámetros que se deben cumplir para la ejecución de este proyecto. Por consiguiente, se evaluó las características petrofísicas de los yacimientos y las propiedades reológicas de los fluidos originales de la misma y de los fluidos empleados para labores de estimulación propuestos (nanofluidos).

Junto a ello, se utilizó el método inductivo puesto que partimos de conocimientos generales especializados en distintos tópicos alrededor del mundo para poder enfocarlo en nuestro caso particular que es el Oriente Ecuatoriano y sus arenas productoras. Empleamos teorías de diversos autores para poder organizarlas, analizarlas y corroborarlas en nuestro caso de estudio en el empleo de los nanofluidos en el subsuelo amazónico.

## **2.2 Diseño de producto**

Se decidió servir como base de información para empresas nacionales y extranjeras que requieran de fuentes para trabajos de estimulación en sus pozos con el fin de realizar proyectos rentables, eficientes y seguros.

Con el objetivo de presentar la información verificada y organizada al lector utilizaremos las herramientas de tablas de contenido y organigramas, además se desea que quienes recurren a este trabajo se encuentren con un material sencillo, didáctico y fácil de entender para ponerlo en práctica o que sirva de fuente para proyectos de similares características.

### 2.3 Formulación de alternativas

La estimulación de pozos consiste en la inyección de un fluido de tratamiento para remediar el daño de formación existente que se generó a partir de prácticas de perforación o completación previas. Se divide en dos tipos dependiendo de la presión de inyección:

- **Estimulación por fracturamiento**, si la presión de inyección y el gasto del fluido son superiores a la presión de fractura de la formación, de modo que este tipo de estimulación genera nuevos canales en el medio poroso por donde puedan circular los fluidos.
- **Estimulación matricial**, si tanto la presión de inyección como el gasto del fluido son bajos en relación con la presión de fractura de la formación. Este tipo de estimulación básicamente busca remediar el daño de la formación mediante una limpieza de la zona dañada.

### 2.4 Descripción y selección de alternativa

Debido a que este trabajo se basó en el uso de nanopartículas como parte de los aditivos para el fluido de reacondicionamiento en los procesos de estimulación de pozos, se eligió el caso de estudio de la *estimulación matricial*; puesto que se desea alcanzar una mayor penetración en el medio poroso. Este requerimiento se lo consigue con el uso de un fluido inteligente que para este trabajo emplearemos el nanofluido, de modo que se obtiene una mejor limpieza debido a su mayor alcance.

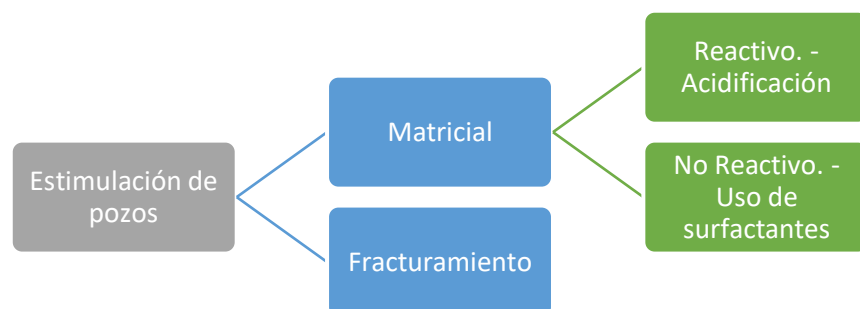


Figura 2.1 Tipos de estimulación de pozos. (Morales y Saltos, 2021)

A continuación, se definen los dos tipos de estimulaciones matriciales existentes:

**La estimulación matricial reactiva** se da básicamente cuando los fluidos utilizados reaccionan químicamente con la matriz de las arenas a tratar, disolviendo los finos presentes que puedan provocar el daño a la formación.

**En estimulación matricial no reactiva**, los fluidos utilizados no generan ningún tipo de reacción química al ponerse en contacto con la formación o los sólidos presentes en el espacio poroso.

**Tabla 2.1 Guía para la selección de la estimulación matricial de acuerdo con el daño de formación. (Silva, 1991)**

Tipo de daño	No reactivo	Reactivo
Bloqueo por agua	Recomendable	Recomendable
Bloqueo por emulsión	Ideal	No válida
Humectabilidad por aceite	Ideal	No válida
Películas interfaciales	Ideal	No válida
Incrustación de sales	No válida	Ideal
Incrustación de finos	Recomendable	Ideal
Perdida de fluidos	Recomendable	Recomendable

El éxito de estas operaciones de reacondicionamiento depende principalmente en el tipo de fluido que se utiliza para cumplir con la estimulación, así como también del tipo de daño y la mineralogía de las arenas. Adicionalmente hay que tener en consideración que, si no se conoce a cierta manera el tipo de daño presente, el único método recomendable para estimulación matricial es la acidificación. (Silva, 1991).

Para la selección de las nanopartículas adecuadas a utilizar como aditivos en los trabajos de remediación de pozos, se deben tomar en cuenta parámetros importantes, tales como:

- **Mineralogía de la formación**, debido a que los elementos poseen beneficios específicos según los minerales presentes en las arenas;
- **Tipo de daño**, a causa de que un determinado nanomaterial brinda beneficios concretos para un daño particular de la formación.
- **Nanomateriales disponibles**, solamente se constan de ciertas nanopartículas, de modo que se debe elegir la que mejor se adapte hacia los problemas que se quieren resolver.

## 2.5 Selección de la mejor alternativa de nanomateriales

Se realizó un análisis comparativo de los beneficios que ofrecen los diferentes nanomateriales y de esta manera se eligió la que mejor se adapta para ser usada en trabajos de remediación de pozos en trabajos estimulación, dependiendo del tipo de daño que se requiera mejorar.

## 2.6 Marco legal

### 2.6.1 Normativa a nivel mundial sobre el uso de nanotecnologías

**ISO/TC 229 Nanotechnologies**, es un comité creado por ISO para normalizar todos los aspectos relacionados a los nanomateriales tales como: definiciones, caracterización, gestión de los procesos que se llevan a cabo y los riesgos que lleva su manipulación. Son 48 las normas existentes sobre los nanomateriales, establecidas por esta comisión. (Chavez, 2015)

Este comité contó con la participación de la American National Standards Institute (ANSI) realizado en el 2005, en el cual se desarrollaron los Estándares internacionales para la Nanotecnología, los cuales trabajan en tres grupos principales:

- Terminología y nomenclatura.
- Medición y caracterización.
- Salud, seguridad y medio ambiente.



## **2.6.2 Normativas locales sobre el uso de nanotecnologías**

Dentro del contexto nacional, las normas que rigen el tema de la Nanotecnología son implantadas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, el cual implementó la normativa ISO/TR 12885 en la norma técnica ecuatoriana NTE con el título de “Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías”. (ISO 12885/TR:2008, IDT)

# CAPÍTULO 3

## 3. Resultados y análisis

La investigación bibliográfica se basó en distintas tesis y papers en los cuales se empleó el uso de nanopartículas como aditivos de los fluidos. De esta manera se formó el nanofluido o también llamado fluido inteligente, el cual tiene diversos beneficios adicionales en comparación con los fluidos convencionales, dichos beneficios serán detallados en el desarrollo de este capítulo, junto con los inconvenientes de su uso, análisis de impacto económico y ambiental que conlleva la aplicación de este fluido.

### 3.1 Indicaciones para trabajos de estimulación

Cada tipo de material consta de diferentes propiedades que lo hacen único a condiciones específicas, motivo por el cual se encontró diversos parámetros necesarios ante la aplicación de un nanofluido en concreto.

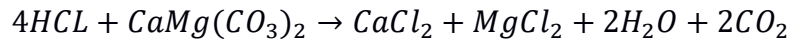
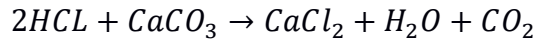
**Tabla 3.1 Indicaciones en el uso de nanomateriales. (Morales y Saltos, 2021)**

Condición de uso	Nanomaterial óptimo	Referencia
Estimulación ácida de carbonatos	Nano níquel	<i>Raj &amp; Pal, 2014.</i>
Arenas no consolidadas	Nanopartículas de carácter catiónico	<i>Kalgaonkar &amp; Chang, 2017.</i>

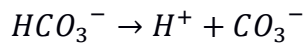
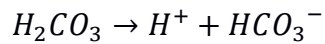
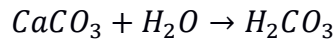
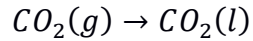
#### 3.1.1 Estimulación ácida en carbonatos

En estimulación de carbonatos, el nano níquel mejora las propiedades del ácido clorhídrico (HCL), optimizando la disolución de las rocas carbonatos. El níquel transforma el CO<sub>2</sub> gaseoso en CO<sub>2</sub> líquido, evitando barreras entre la formación y el ácido; además ayuda a la formación de ácido carbónico que facilita la disolución de finos. (Raj & Pal, 2014)

Reacciones formadas por el contacto del HCL con la formación.

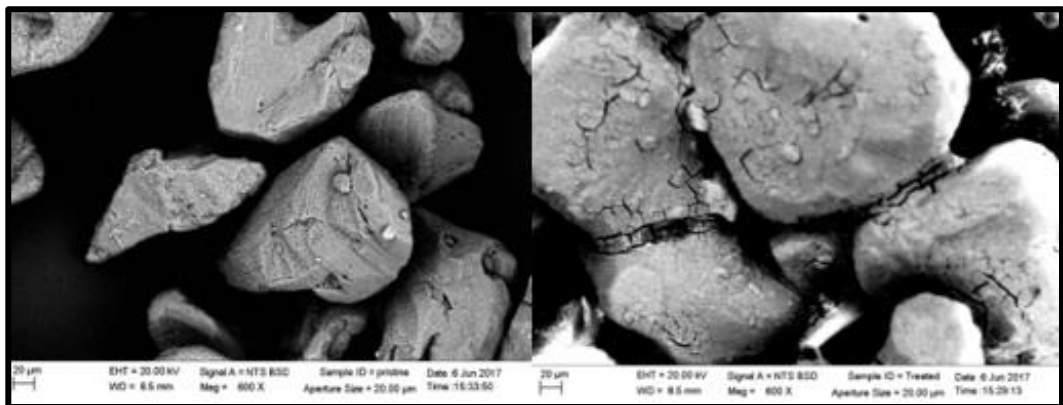


Reacciones del Níquel:



### 3.1.2 Arenas no consolidadas

*Kalgaonkar et al.*, utilizaron nanopartículas cuya superficie fue tratada para que su composición polar sea de carácter catiónico; de modo que al penetrar en la formación dañada por arenas o arenas no consolidadas (las mismas que tienen una polaridad negativa) se fijan en su superficie por atracción polar y es debido a estos enlaces que funcionan como material cementante.



**Figura 3.1 Micrografía de partículas de arena no tratadas y tratadas con nanopartículas catiónicas. (Kalgaonkar & Chang, 2017)**

### 3.2 Beneficios del uso de nanopartículas en la estimulación de pozos

El uso de fluidos inteligentes **ayuda a potenciar diversos parámetros** que intervienen en los diferentes trabajos a los que pueden ser empleados en los pozos petroleros, tales como su uso en como lodos de perforación o fluidos de completación; así como a los diferentes trabajos de estimulación de pozos, ya sea estimulación matricial (acidificación o uso de surfactantes) o de fracturamiento hidráulico.

Los nanofluidos al ser utilizados en reemplazo de los fluidos convencionales de perforación y completación, entran en contacto directo con la formación con lo cual reducen los principales daños de formación creados durante estas operaciones como pérdidas de filtrado, taponamiento de la formación por los sólidos presentes en los mismos, entre otros; además los beneficios que puedan brindar los diferentes elementos a tamaño nanométrico, abarcan acciones tales como: alterar la reología de los mismos fluidos o incluso reaccionar con la mineralogía de las arenas para dar paso a nuevas propiedades.

En la estimulación de pozos, al usar nanopartículas como parte de los aditivos del fluido utilizado, se espera que penetren en zonas de mayor profundidad de la formación (en los lugares de las arenas que se encuentren con mayor daño, donde las porosidades y permeabilidades sean relativamente bajas), para que de este modo contribuyan en el ingreso con mayor facilidad tanto a los surfactantes como a los ácidos; logrando que la remediación tenga mayores efectos en la producción del crudo.

**Tabla 3.2 Beneficios generales de diferentes nanopartículas en trabajos de pozos. (Morales y Saltos, 2021)**

<b>Material empleado</b>	<b>Parámetro beneficiado</b>	<b>Referencia</b>
Oxido de Silicio	Pérdida de filtrado	<i>Adel Salem (2015)</i>
Nanofluido complejo	Perfecciona trabajos de EOR	<i>Kutty et al. (2015)</i>
Dióxido de silicio	Aumento del FR	<i>Aimara (2019)</i>
Silicio	Alteración de mojabilidad	<i>Sheshdeh et al. (2015)</i>
Nano bentonita	Reología del lodo y pérdida de filtrado	<i>Sánchez y Viveros (2018)</i>
Nano sílice	Pérdida de filtrado y espesor de revoque	<i>Laura Valencia (2019)</i>
No especificada	Control de emulsiones	<i>Larco y Montesdeoca (2019)</i>
Nano grafeno	Filtrado del lodo	<i>Córdoba (2020)</i>
Óxido de Silicio, Óxido de Aluminio y Óxido de Hierro	Reología del lodo	<i>Tarek y El-Bandi (2015)</i>
Nano sílice	Reología, Propiedades de filtrado y cambio de humectabilidad	<i>Hernández y Miranda (2020)</i>

**Tabla 3.3 Parámetros potenciados. (Morales y Saltos, 2021)**

<b>Parámetro beneficiado</b>	<b>Nanomaterial</b>	<b>Detalle</b>	<b>Referencia</b>
Penetración en la formación	Nano silicio con y sin recubrimiento, nanopartículas de fullerol y nanotubos de carbono	Valores de penetración de hasta 15 metros	<i>Caldelas et al., 2011.</i> <i>Lecoanet et al., 2004</i>
Favorece las propiedades de surfactantes viscoelásticos	Óxido de zinc y óxido de magnesio	Aumento del límite de temperatura para trabajos en el pozo	<i>Al-muntasheri et al., 2016</i>
Humectabilidad	Nano gotas de petróleo	Alteración de la humectabilidad de acuerdo con el requerimiento	<i>Yuan et al., 2019</i>

Viscosidad, Promueve las propiedades de emulsiones O/W	Óxido de silicio	Estabilización de la viscosidad, estabilidad térmica	<i>Al-muntasheri et al., 2016.</i> <i>Sergeev et al., 2019</i>
Humectabilidad, mejora las propiedades de los lodos de perforación, estimulación ácida	Nano silicio	Favorece la reología de los lodos de perforación, alteración de la humectabilidad	<i>Singh et al., 2018</i>

### 3.2.1 Beneficios en la penetración

*Caldelas entre otros* investigaron sobre los diferentes parámetros que afectan la propagación de nanomateriales en el medio poroso, utilizando silicio recubierto con glicol polietileno y silicio sin recubrimiento; además simulaban formaciones de arenisca y limonita con un sandpack. Determinaron que factores como el contenido y tipo de arcilla, la salinidad de la salmuera, entre otros, influye en la retención de las nanopartículas mientras que la temperatura no causa efecto alguno. Cabe detallar que mientras mayor sea la concentración de la salmuera mayor será la retención de los nanomateriales y que existen zonas donde la retención será más evidente y otras donde la propagación será con la mínima detención. (*Caldelas et al., 2011*)

*Lecoanet et al.*, usaron 8 diferentes nanopartículas para investigar cómo se comportan en el medio poroso a escala de laboratorio, usando un spherical glass beads como simulador de la formación. Teóricamente, nanopartículas de fullerol y nanotubos de carbón modificados penetran dentro de las areniscas en valores de 10 a 15 metros. (*Lecoanet et al., 2004*)

### 3.2.2 Beneficios de nanopartículas de óxido de zinc y oxido de magnesio

Aumenta el límite de trabajo de 200°F a 250°F para surfactantes viscoelásticos (VES), dándole estabilidad térmica, además del control de goteo y favorecimiento de la viscosidad.

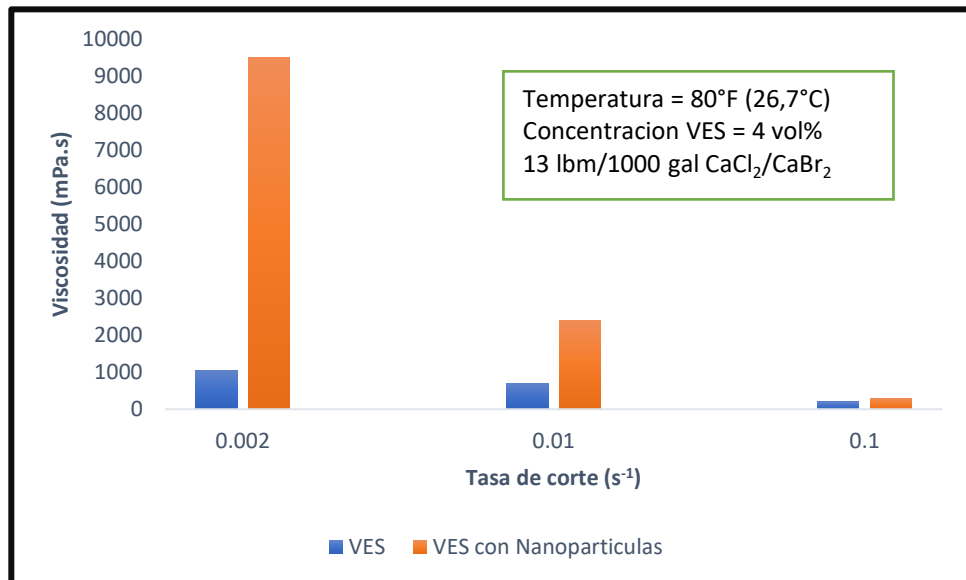


Figura 3.2 Efecto de nano ZnO en la viscosidad del VES. (Al-muntasheri et al., 2016)

### 3.2.3 Beneficios en la alteración de humectabilidad

En un estudio realizado por *Yuan et al*, se usó nano gotas de petróleo en salmuera. Las pruebas de laboratorio demostraron que al usar una concentración del 1% wt la alteración de la mojabilidad aumenta de 57 a 125 grados, cambiando la preferencia de la matriz de petróleo hacia agua; además cuenta con la mejor tasa de imbibición, pero existe mayor entrapamiento de petróleo remanente en la zona barrida, lo cual disminuye con una concentración de 0,1 % wt.

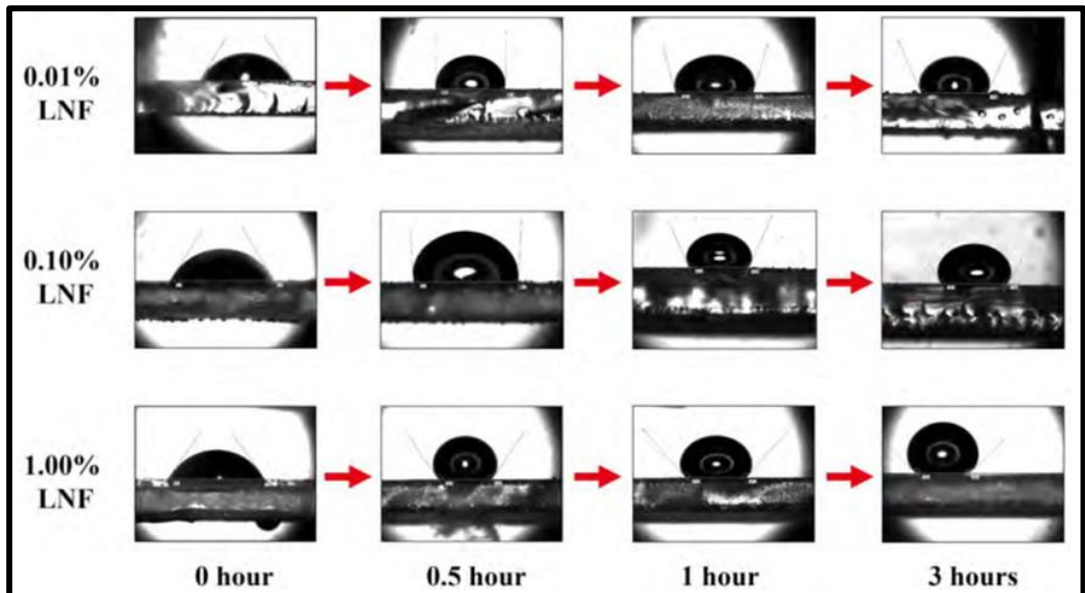


Figura 3.3 Medida del ángulo de contacto de gota de keroseno en superficie mojada por petróleo sumergido en diferentes concentraciones de nanopartículas. (Yuan et al., 2019)

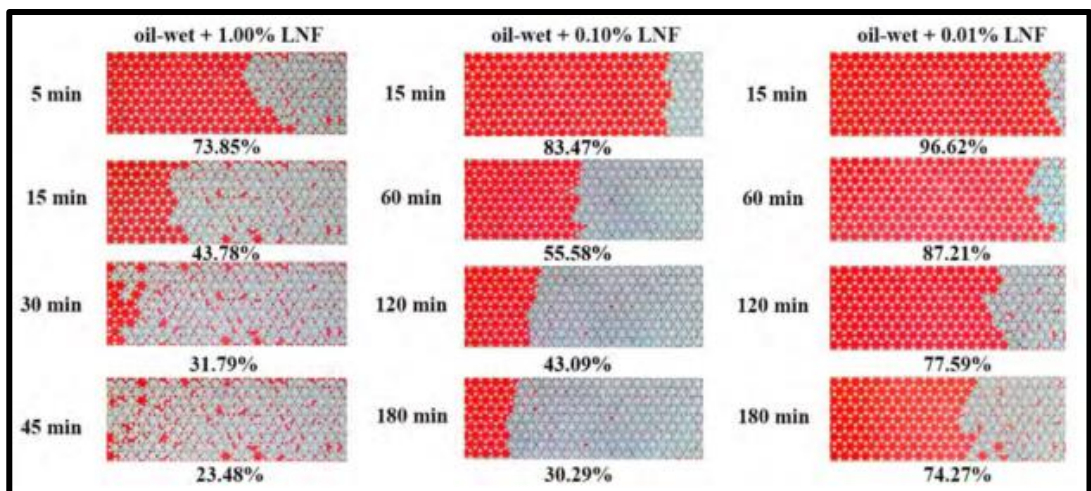
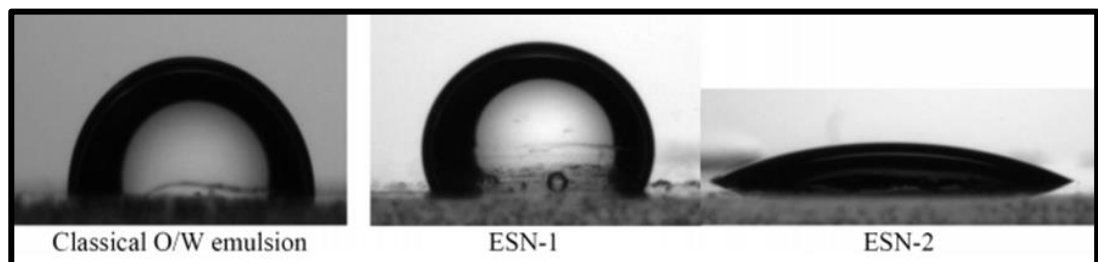


Figura 3.4 Invasión de agua dentro de un micro modelo saturado al petróleo con afinidad a hidrocarburos a diferentes concentraciones de LNF. (Yuan et al., 2019)



### 3.2.4 Beneficios del óxido de silicio

- Evita daños durante operaciones de perforación
- Ayuda a estabilizar los valores de viscosidad a los fluidos utilizados en fracking hasta presiones de 20000 psi, donde dichos fluidos pierden hasta su 80%. (Al-muntasheri et al., 2016)
- *Sergeev et al.*, demostraron una estimulación en la estabilidad térmica a temperaturas de hasta 140°C en relación con emulsiones O/W convencionales. Otro factor potenciado es el cambio de viscosidad del agua de formación, generándose bloqueos por aguas que evitan el goteo dentro de la estructura (perjudicial debido a que aumenta el daño). Dependiendo de las características que se necesite, se puede alterar la mojabilidad de la roca al usar nanopartículas de diferente recubrimiento.



**Figura 3.5 Efectos de gota de salmuera con (ESN) y sin nanopartículas sobre superficie de vidrio. (Sergeev et al., 2019)**

### 3.2.5 Beneficios del Nano sílice

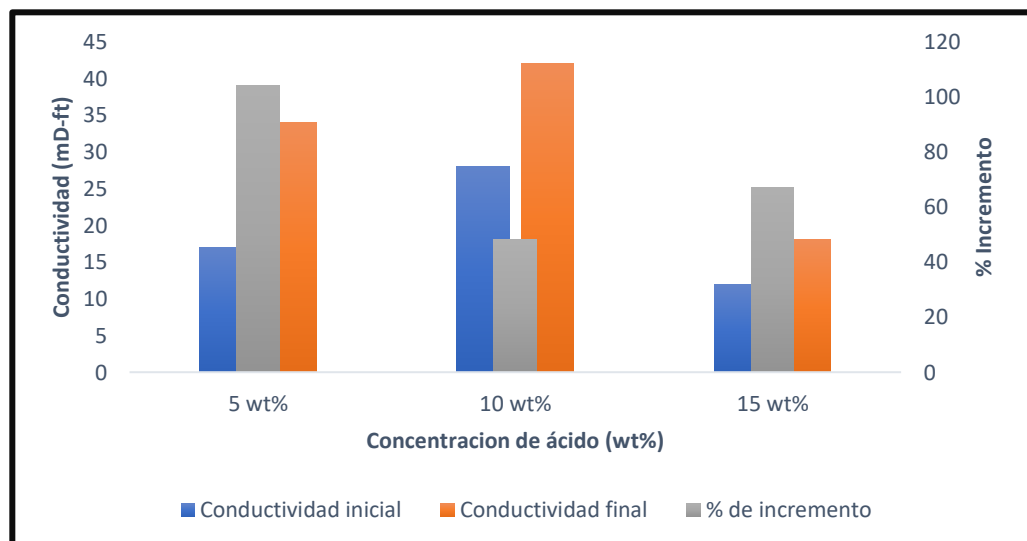
- Altera la humectabilidad de la roca para que obtenga una afinidad al agua, de modo que se consigue un mayor flujo de hidrocarburos en el espacio poroso.
- En concentración de 1% wt se dan mejores resultados al usar la composición de lodo que tiene diferente soda xántica y 1lpb más de almidón, obteniendo mejores reologías del lodo. No es ideal en rocas oleofílicas, debido a que aumentan su humectabilidad. Además, según

el análisis financiero a pesar del incremento del 10% por barril de fluido, es rentable el uso del nanofluido a largo plazo.



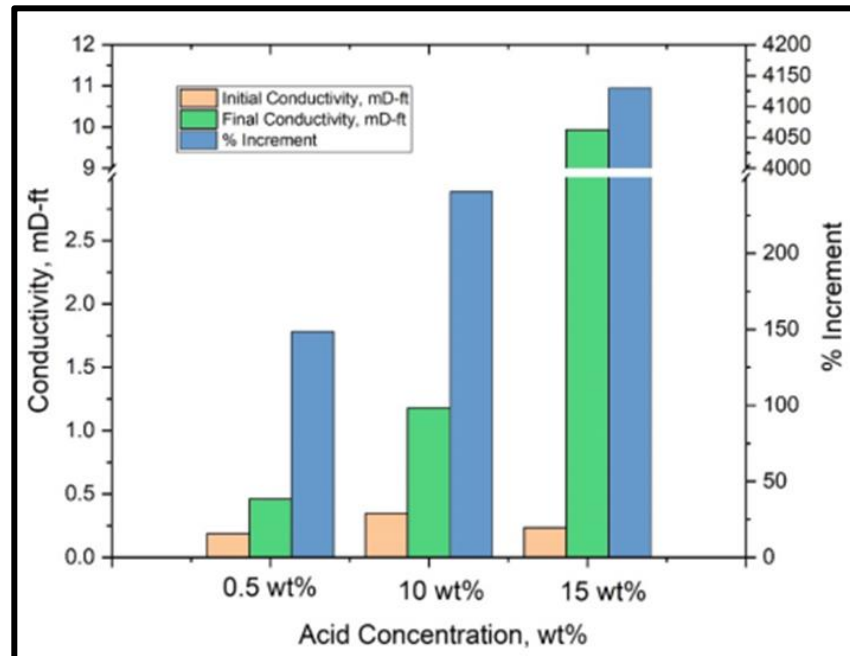
**Figura 3.6 Variación de ángulo de contacto de roca oleofílica antes y después del filtrado.**

- Nanopartículas de silicio recubiertas para hacerlas de naturaleza hidrofóbica se pueden mezclar con Ácido Clorhídrico HCL para crear una encapsulación del ácido en una emulsión conocida como agua en aire, o ácidos micro encapsulados (MEA). Al usar estos MEA en la estimulación de formaciones ricas en carbonato de calcio se tiene un considerable incremento en la conductividad de la matriz, por la creación de cavidades en su superficie.



**Figura 3.7 Conductividad de la fractura en limonita Indiana. (Singh et al., 2018)**

La conductividad para las arcillas Eagle Ford incremento a valores de 4000% después del mismo tratamiento con MEA. Este aumento se debe a la liberación de los ácidos generó una configuración de cavidades no uniformes, dependiendo de la concentración del ácido.



**Figura 3.8 Conductividad de la fractura de arcillas Eagle Ford antes y después del tratamiento con MEA. (Singh et al., 2018)**

### 3.3 Inconvenientes del uso de nanotecnología en las operaciones petroleras

Los inconvenientes que pueden provocar los nanomateriales son tanto a la salud de las personas quienes tienen su manipulación directa como también al medio ambiente en general.

Los riesgos a la salud de las personas se dan por el hecho de que las nanopartículas pueden entrar fácilmente al cuerpo humano por diferentes medios como inhalación, ingesta o de forma cutánea (Galera, 2015); y al ser agentes externos generarían diferentes reacciones dependiendo el tipo de material y la concentración del mismo.

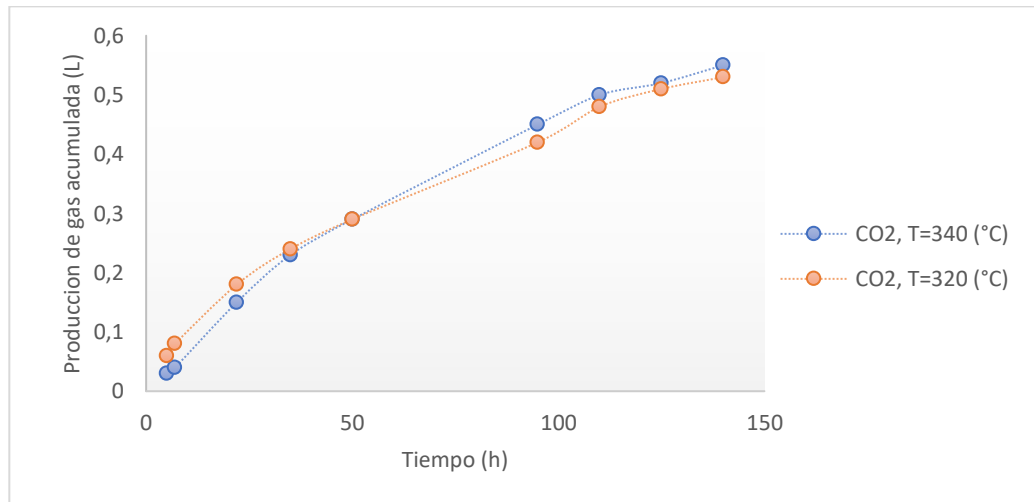
El propio hecho del tamaño de estos materiales tiene como consecuencia su fácil propagación en el medio en general, pudiendo considerarse como agentes contaminantes y con la característica de tener una difícil recuperación de los mismos, no pudiendo realizarse por métodos convencionales. (Quina, 2004)

De igual manera existen estudios tales como el de *Álvaro Veiga-Álvarez et al.* (2015) en el que se concluye que materiales como los nanotubos de carbono tienen el potencial de causar tumores cancerígenos, inflamación y fibrosis pulmonar. Además, indica que el óxido de silicio está relacionado con alteraciones pulmonares y cardiovasculares y cáncer de pulmón. De acuerdo con sus investigadores, para los nanotubos de carbono se debe mantener una ELR (Exposición Límite Recomendada) de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para el dióxido de silicio aún no se registran valores límites en su trabajo.

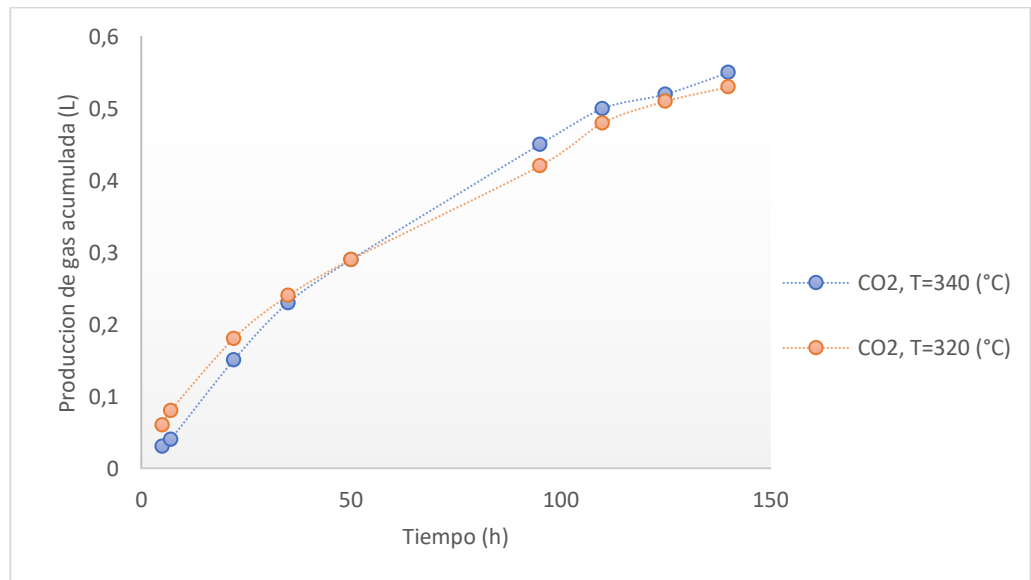
### **3.4 Impactos generados**

#### **3.4.1 Impacto Ambiental**

El uso de nuevas tecnologías en el mejoramiento in situ de hidrocarburos, tiene su importancia al bajar el nivel de emisiones de ghg (GEI) gases de efecto invernadero en español.. Como lo demostró Hashemi et al. (2014), al usar catalizadores tri-metálicos se reduce la emisión de  $\text{CO}_2$  al ambiente. A condiciones de reservorio de altas presiones y temperaturas (HPHT) se determinó reducciones de hasta 50%, comparado en casos sin el uso de nuevas tecnologías.



**Figura 3.9** Volumen acumulado de dióxido de carbono producido en ausencia de nano catalizadores tri-metálicos. Elaborado por (Hashemi et al., 2014), editado por (Morales y Saltos, 2021)



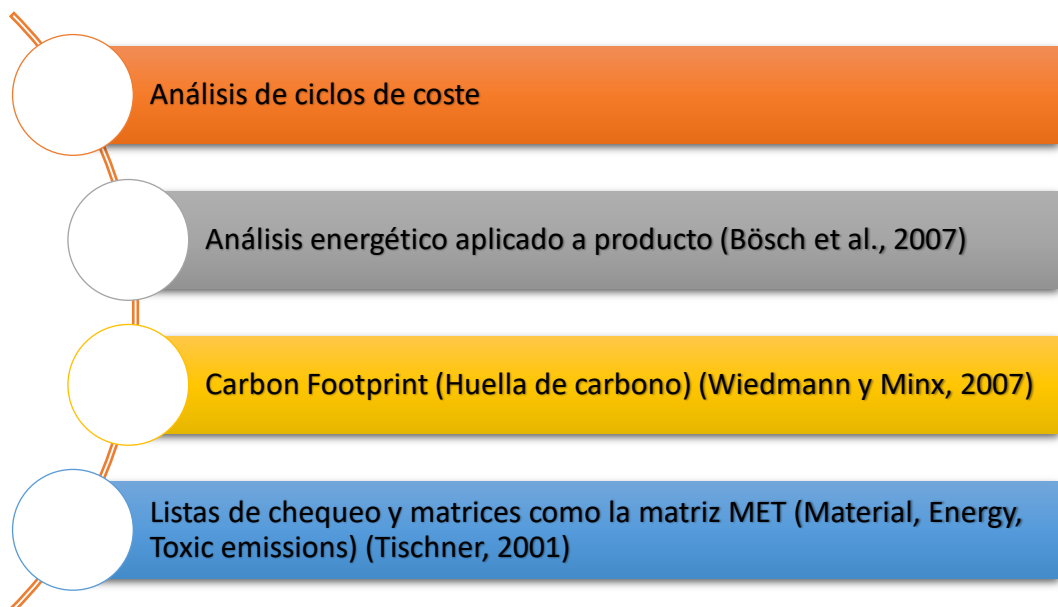
**Figura 3.10** Volumen acumulado de dióxido de carbono producido en presencia de nano catalizadores tri-metálicos. Elaborado por (Hashemi et al., 2014), editado por (Morales y Saltos, 2021)

En trabajos de control de pozos se pudo evidenciar una reducción del BSW y en pruebas de laboratorio la fase de agua se encontró libre de petróleo, esta

información indica que la adición de nanopartículas en fluidos de control contribuye al medio ambiente puesto que al tratar el agua de formación o reinyectarla no tendrá hidrocarburos presentes. (Larco y Montesdeoca, 2019)

De acuerdo con *Medina Miguel et al.* (2015) los impactos generados que se han estudiado a los nanomateriales se enfocan en el personal que labora expuesto a los mismos, dejando los temas ambientales rezagados. Debido a esto, se han realizado pocos estudios que permitan concluir con bases sólidas los efectos a largo plazo que el uso de estos materiales derivará en la salud de los seres vivos y entorno en el que viven.

*Sánchez Carmen* (2014) en su tesis doctoral, presenta diversas metodologías para llevar a cabo la evaluación de impactos ambientales con relación a los nanomateriales. De acuerdo con el área energética de la Industria Petrolera podemos mencionar los siguientes métodos:



### **3.4.2 Impacto Productivo**

En relación con el trabajo de *Larco y Montesdeoca, 2019* donde se detalla que en un trabajo de reacondicionamiento de pozos en el Oriente Ecuatoriano en el cual se utilizó nanofluidos de control, se registró un descenso en el BSW de 4% y un aumento espontáneo de producción de 119 BPPD. Se calculó además una certeza del 100% con el uso de nanofluidos en comparación a 72.22% con el uso de fluidos de control convencionales; por lo que se sugiere que, si se realizara trabajos dirigidos a la estimulación de pozos mediante fluidos focalizados a potenciar la producción diaria de crudo, los valores aumentarían considerablemente teniendo como base un incremento del 100% de producción de crudo como base.

### **3.4.3 Impacto Económico**

De acuerdo con el apartado anterior donde se detalla que con el uso de nanofluidos de estimulación se puede conseguir 100 BPPD adicionales, mediante estos datos podemos hacer un análisis económico donde se pronostica que en un pozo se obtendrá alrededor de \$5368 mensuales de ganancias agregadas de acuerdo con el precio del barril de crudo WTI (referencia para crudo ecuatoriano) de \$53.68 establecido al corte del 14 de enero del 2021.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Todas las investigaciones realizadas convergen en que, al usar nanomateriales como aditivos, contribuye a que el nanofluido tenga una mayor penetración en la formación; de modo que este fluido inteligente cumple su trabajo más eficientemente.
- Se señala que el uso de nanopartículas en fluidos de estimulación es absolutamente beneficioso para las propiedades de los fluidos de reservorio, roca reservorio y procesos de recuperación de crudo.
- Se define que de acuerdo con los parámetros que se requieran potenciar se recomienda el uso de los siguientes nanomateriales:
  - Mayor penetración en formación → Nano silicio, nanopartículas de fullerol o nanotubos de carbono.
  - Alteración de la humectabilidad → Nano gotas de petróleo o nano silicio.
  - Estabilización de la viscosidad → Óxido de silicio.
  - Disminución de filtrado de lodo → Óxido de silicio, nano bentonita, nano sílice, nano grafeno.
- Los parámetros potenciados mediante la inserción de la nanotecnología a los procesos de estimulación de pozos de acuerdo con los compuestos elegidos son:
  - Disminución de Filtrado.
  - Perfeccionamiento de trabajos de EOR.
  - Aumento del Factor de Recobro.
  - Mojabilidad de la roca (Alternabilidad).
  - Reología del lodo.
  - Control de emulsiones.
  - Aumento de Penetración en la formación.
  - Estabilización de la Viscosidad.



- Actúan como agente cementante para rocas no consolidadas.
- Los impactos ambientales que se evidencian mediante el uso de catalizadores tri-metálicos son la reducción de hasta el 50% de CO<sub>2</sub> en condiciones de reservorio (HPHT) en comparación con métodos convencionales.
- Debido a que una consecuencia del uso de nanopartículas en trabajos de reacondicionamiento es la limpieza de la interfaz del agua se concluye que contribuye al medio ambiente en el momento que esta agua sea reinyectada para procesos de EOR o tratamientos de agua de formación.
- En relación con los impactos productivos se tiene datos en campo donde la tasa aumentó el 117.82% (119 BPPD) con una certeza del 100% en comparación con otros trabajos de estimulación convencionales en las que su certeza llegó al 72.22%.

## **4.2 Recomendaciones**

- Realizar pruebas de estimulación en núcleos pertenecientes al oriente ecuatoriano con nanomateriales como aditivos, para verificar sus propiedades y posible aplicación en campo en futuros trabajos.
- Regirse mediante las normas de salud laboral en relación con el uso de nanopartículas al momento de trabajar con nanofluidos.
- Se recomienda investigar el uso de nanomateriales en trabajos de remediación ambiental luego de derrames de hidrocarburos; ya que, ciertas partículas tienen la capacidad de alterar las emulsiones entre petróleo y agua, de esta forma se facilita la recuperación de aceites en el medio.

- Realizar evaluaciones de impacto ambiental con el objetivo de estudiar más a detalle los inconvenientes a largo plazo que ocasiona el uso de nanomateriales en las actividades de extracción de crudo.

# BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, M. A., & Narimanov, A. A. (1997). *Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression*, Republic of Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 14(4), 451–468. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(97)00011-1)
- Aimara, e. (2019). *Estudio para el incremento del factor de recobro en núcleos de las arenas “T” y “U” del campo Shishufindi con la aplicación de recuperación mejorada mediante la inyección de nanofluidos*. Escuela Politecnica nacional.
- Amanullah, M., Al-Arfaj, M. K., & Al-Abdullatif, Z. (2011). *Preliminary test results of nano-based drilling fluids for oil and gas field application*. SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, 1(1965), 112–120. <https://doi.org/10.2118/139534-ms>
- Caldelas, F., Murphy, M. J., Huh, C., & Bryant, S. L. (2011). *Factors governing distance of nanoparticle propagation in porous media*. SPE Production and Operations Symposium, Proceedings, 2010, 713–728. <https://doi.org/10.2118/142305-ms>
- Chavez, W. (2015). *Estudio Farmacocinético Preclínico de una Formulación en Nanopartículas de Liberación Inmediata a base de Glimepirida*. Universidad Central Del Ecuador.
- Cordoba, R. (2020). *Análisis experimental de la implementación de nanopartículas en fluidos de perforación base agua para el mejoramiento de sus propiedades fisicoquímicas en la zona de overburden del campo chichimene en la formación carbonera*. [Fundación Universidad Americana]. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Delgado, G. C. (2006). *Riesgos ambientales de la nanotecnología: nanopartículas y nanoestructuras* *Environmental Risks of Nanotechnology: Nanoparticles and Nanostructures*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 31(1), 34–39. [www.revistas.una.ac.cr/ambientales](http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales)
- Em, M., Geol, E. N. G., & Minas, D. E. (2010). *Geología de sistemas petrolíferos*.
- Fakoya, M. F., & Shah, S. N. (2014). *Enhancement of filtration properties in surfactant-based and polymeric fluids by nanoparticles*. SPE Eastern Regional Meeting, 2014-January (January), 329–340. <https://doi.org/10.2118/171029-ms>

- Galera, A. (2015). *El impacto de la nanotecnología sobre la seguridad y la salud laboral*. ORPjournal, 0(2), 31–58.
- Hashemi, R., Nassar, N. N., & Pereira Almaso, P. (2014). *In situ upgrading of athabasca bitumen using multimetallic ultradispersed nanocatalysts in an oil sands packed-bed column: Part 2. Solid analysis and gaseous product distribution*. Energy and Fuels, 28(2), 1351–1361. <https://doi.org/10.1021/ef401719n>
- Hernández, M., & Miranda, N. (2020). *Optimización de los fluidos de perforación base agua utilizados en un campo de crudo pesado en la cuenca de los llanos orientales mediante el uso de nanotecnología*. Fundación Universidad de América.
- Kutty, S. M., Kuliyeve, M., Hussein, M. A., Chitre, S., Mustafa, H., Penny, G., Wehbeh, J., Germack, D., Shedd, D., & Lelenwa, C. (2015). *Well performance improvement using complex nano fluids*. Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2015. <https://doi.org/10.2118/177831-ms>
- Larco, A., & Montesdeoca, C. (2019). *Optimización del fluido de completación para reacondicionamientos de pozos*. Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Lecoanet, H. F., Bottero, J. Y., & Wiesner, M. R. (2004). *Laboratory assessment of the mobility of nanomaterials in porous media*. Environmental Science and Technology, 38(19), 5164–5169. <https://doi.org/10.1021/es0352303>
- Maritza, L., & Quiceno, V. (2019). *Efecto de la distribución del tamaño de partículas a escala nanométrica en los fluidos de perforación base agua : Reducción del filtrado y espesor del revoque*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mcelfresh, P., Olguin, C., & Ector, D. (2012). *The application of nanoparticle dispersions to remove paraffin and polymer filter cake damage*. Proceedings - SPE International Symposium on Formation Damage Control, 2, 1035–1041. <https://doi.org/10.2118/151848-ms>
- M., M. E. M., R., L. E. G., & G., y R. E. R. (n.d.). *Las nanopartículas Y El Ambiente*. 49–58.
- Narimanov, A A, & Palaz, I. *Oil history, potential converge in Azerbaijan*. United States.
- Quina, F. H. (2004). *Nanotecnologia e o meio ambiente: Perspectivas e riscos*. Quimica Nova, 27(6), 1028–1029. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000600031>

- Ragab, A. M. S., & Ph, D. (2015). *Mitigation of Formation Damage by Designing a Novel Nanoparticles Mud The 1st International Conference on Nanotechnology and its Applications Qena – Luxor, Egypt Mitigation of Formation Damage by Designing a Novel Nanoparticles Muds*. December.
- Raj, N., & Pal, T. V. (2014). *Enhancing Efficiency of HCl Based Stimulating Fluids by Creating In-Situ*.
- Salazar, A. M., Frenz, P., Valdivia, L., & Hurtado, I. (2013). *Evaluación de Competencias de los Gestores de la Salud y Seguridad Ocupacional en Chile. Skills Evaluation of the Occupational Safety and Health managers in Chile*. Cienc Trab, 15(48), 10.
- Sanchez, L., & Viveros, M. (2018). *Evaluación técnica a escala laboratorio de un fluido de perforación base agua utilizando nano-partículas de lm-200 para la inhibición de lutitas en el campo castilla de Ecopetrol s.a* (Vol. 51, Issue 1). FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Sheshdeh, M. J. (2015). *A review study of wettability alteration methods with regard to nano-materials application*. Society of Petroleum Engineers - SPE Bergen One Day Seminar 2015, 513–524. <https://doi.org/10.2118/173884-ms>
- Srivatsa, J. T., & Ziaja, M. B. (2011). *An experimental investigation on use of nanoparticles as fluid loss additives in a surfactant - polymer based drilling fluid*. International Petroleum Technology Conference 2011, IPTC 2011.
- Swanson, C., Hill, W. A., Nilson, G., Griman, C., Hill, R. M., Sullivan, P., Aften, C., Jimenez, J. C., Pietrangeli, G., Shedd, D. C., Purlsey, J. T., & Industries, F. (2018). *Post-Frac Hit Mitigation and Well Remediation of Woodford Horizontal Wells Using a Solvent/Surfactant Chemistry Blend Now with Sheridan Production Company, LLC*. The URTEC Technical, 23–25. <https://doi.org/10.15530/urtec-2018>
- Tarek, M., & El-Banbi, A. H. (2015). *Comprehensive investigation of effects of nano-fluid mixtures to enhance oil recovery*. Society of Petroleum Engineers - SPE North Africa Technical Conference and Exhibition 2015, NATC 2015, 1227–1236. <https://doi.org/10.2118/175835-ms>

- Veiga-Álvarez, Á., Sánchez-de-Alcázar, D., Martínez-Negro, M., Barbu, A., González-Díaz, J. B., & Maquea-Blasco, J. (2015). *Riesgos para la salud y recomendaciones en el manejo de nanopartículas en entornos laborales*. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 61(239), 143–161. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2015000200002>
- Villacís, A. C. A. (2017). *El Petróleo y la Sostenibilidad Fiscal en el Ecuador Periodo 2008-2016*. Allen Celiano Almeida Villacís. 1–59.
- Wong, K. V., & De Leon, O. (2010). *Applications of nanofluids: Current and future*. *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2010/519659>

