

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Estudio de nuevas técnicas a nivel de subsuelo desarrolladas para el control y el tratamiento de sólidos de formación.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Petróleo

Presentado por:

García Pisco Kevin Aldair

Preciado Cedeño Génesis Inés

Tutor:

MSc. Arcentales Bastidas Danilo Andrés

MSc. Guzmán Velásquez Andrés Eduardo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico en primer lugar a mi familia por brindarme el apoyo, consejos, comprensión y ayuda necesaria para cumplir este sueño.

A mis amigos por siempre estar a mi lado en los momentos más difíciles.

A mis profesores por guiarme con conocimiento y ser el pilar para la construcción de mi vida profesional.

Gracias a todos mis compañeros de la Universidad quienes me permitieron entrar en su vida, quienes me han ofrecido su calidez.

- García Pisco Kevin Aldair

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia, especialmente a mi padre y a mi madre por su constante apoyo para poder culminar mis estudios.

A mis amigos y a mi novio, por su motivación constante en el desarrollo de todas mis metas.

Y a mis profesores, por tenderme su mano y prestarme sus conocimientos durante estos años.

- Preciado Cedeño Genesis Inés

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *García Pisco Kevin Aldair* y *Preciado Cedeño Genesis Inés* y 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"

García Pisco Kevin
Aldair

Preciado Cedeño
Genesis Inés

EVALUADORES

.....
MSc. Sagnay Sares Fernando Javier

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. Arcentales Bastidas Danilo Andrés

PROFESOR TUTOR

.....
MSc. Guzmán Velásquez Andrés Eduardo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La presente tesis tiene la finalidad de realizar una revisión y análisis de las nuevas técnicas a nivel de subsuelo dirigidas a la disminución de los problemas operacionales causados por la producción de sólidos de formación. Primero se clasificaron los sedimentos según el diámetro de las partículas y las características mineralógicas. Luego, se estudiaron las metodologías para predecir la producción de sólidos de formación, y a continuación, se describieron las técnicas para solucionar la problemática. Para la selección de un mecanismo de control, en el caso de los métodos mecánicos se usaron variables granulométricas, como lo son el tamaño de grano y el coeficiente de uniformidad, mientras que para los métodos químicos se emplearon características de la formación. Finalmente, se realizó una comparativa entre los parámetros seleccionados y la información de un caso de estudio correspondiente a un campo petrolero ecuatoriano, en donde se identificó técnicamente la solución más eficiente. En base al trabajo realizado, para el caso de estudio se recomendó la utilización combinada entre un empaque de grava y un liner ranurado, ya que los métodos químicos presentan limitaciones, y porque otros métodos mecánicos no cumplían los requerimientos. Concluyendo que los métodos mecánicos son la mejor opción para el caso de estudio, además se sugiere el uso de un modelo híbrido entre metodología analítica y métodos numéricos para la predicción del arenamiento, y se plantean el posible uso de otros parámetros importantes para la selección de un mecanismo de control de sólidos de formación.

Palabras Clave: granulometría, mineralogía, modelo geomecánico, modelos numéricos.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to carry out a review and analysis of new techniques at the subsoil level aimed at reducing operational problems caused by the production of formation solids. Sediments were first classified according to particle diameter and mineralogical characteristics. Then, the methodologies to predict the production of formation solids were studied, and then the techniques to solve the problem were described. For the selection of a control mechanism, in the case of mechanical methods, granulometric variables were used, such as grain size and uniformity coefficient, while formation characteristics were used for chemical methods. Finally, a comparison was made between the selected parameters and the information from a case study corresponding to an Ecuadorian oil field, where the most efficient solution was technically identified. Based on the work carried out, for the case study, the combined use of a gravel pack and a grooved liner was recommended, since the chemical methods present limitations, and because other mechanical methods did not meet the requirements. Concluding that mechanical methods are the best option for the case study, the use of a hybrid model between analytical methodology and numerical methods is also suggested for the prediction of sandblasting, and the possible use of other important parameters for the selection of a formation solids control mechanism.

Key Words: granulometry, mineralogy, geomechanical model, numerical models.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Marco teórico.....	3
1.4.1. Fundamentos teóricos	3
1.4.2. Antecedentes.....	8
CAPITULO II.....	11
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1. Caracterización mineralógica y granulométrica de los sólidos de formación que tienden a migrar.	11
2.2. Condiciones físicas que intervienen en la producción de sólidos de formación. 13	
2.2.1. Mecanismos físicos de arenamiento.....	13
2.2.2. Producción de finos en formaciones de areniscas.....	14
2.3. Metodologías para predecir la existencia de producción de sólidos de formación en los campos.	16
2.4. Técnicas usadas para controlar la producción de sólidos de formación.....	17
2.4.1. Control de la tasa de producción	17
2.4.2. Completación de pozos y métodos mecánicos	17
2.4.3. Métodos químicos aplicados en la formación	22
2.5. Caso de Estudio	25

Capítulo III	27
3. Análisis	27
3.1. Tamaño de los sedimentos implicados en la migración de sólidos de formación 27	
3.2. Predecir la existencia de sólidos de formación en los campos.....	28
3.3. Resultados obtenidos de la aplicabilidad de los métodos de control de sólidos de formación	29
3.4. Resultados de la comparativa entre las condiciones del caso de estudio y las soluciones descritas	42
Capítulo IV.....	46
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	46
Conclusiones.....	46
Recomendaciones.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	1
APÉNDICES.....	6

ABREVIATURAS

SCON	Chemical sand consolidation (Consolidación química de arena)
MEM	Mechanical Earth Model (Modelo de tierra mecánico)
FEM	Finite Element Method
FD	Finite Difference Method
BEM	Boundary Element Method
DEM	Discrete Element Method
DA	Discontinuous Deformation Analysis
BPM	Bonded Particle Model
MM	Meshless Method
EICP	Enzyme urease induced carbonate precipitation
PSD	Particle size distribution

SIMBOLOGÍA

U	Coeficiente de Uniformidad
μm	Micrómetro
Mm	Milímetro
mD	Milidarcy
T	Temperatura
ft	Feet (Pies)
pH	Potencial de hidrógeno

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Movimiento de los granos de arena causado por el flujo de fluidos	4
Figura 1.2 Clasificación de los sólidos según el tamaño	5
Figura 1.3 Problemas de la producción de arena en un pozo	8
Figura 2.4 Aplicabilidad de disparos orientados	18
Figura 2.5 Aplicabilidad de un liner ranurado	19
Figura 2.6 Aplicabilidad de un empaque de grava.....	20
Figura 2.7 Aplicabilidad de las mallas premium.....	21
Figura 2.8 Aplicabilidad del Frac Pack	22
Figura 2.9 Recubierto de nanopartículas 20/40 U.S Malla de arena (Izquierda) Finos de la formación fijados sobre los granos de arena (Derecha)	24
Figura 2.10 Químicos conectando los granos como tratamientos de consolidación de arena	24
Figura 2.11 Microscopía electrónica de barrido sin tratamiento (izq) y con tratamiento (der).....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los sedimentos según Udden-Wentworth	12
Tabla 2.2 Caracterización de la formación productora según el coeficiente de uniformidad	12
Tabla 2.3 Caracterización de la formación productora según el coeficiente de uniformidad	26
Tabla 2.4 Parámetros de análisis para el método químico de control de arena.	26
Tabla 3.5 Clasificación de los sedimentos en base al tamaño, mineralogía y condiciones	28
Tabla 3.6 Comparativa entre metodologías para la predicción de producción de sólidos de formación.....	28
Tabla 3.7 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de los disparos orientados	30
Tabla 3.8 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de un liner ranurado	32
Tabla 3.9 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de un empaque de grava	35
Tabla 3.10 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de las mallas premium	37
Tabla 3.11 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de frac pack	39
Tabla 3.12 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de una consolidación química de arena	41
Tabla 3.13 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de la aglomeración de arena	42
Tabla 3.14 Comparativa de los parámetros recomendados para la aplicación de cada método mecánico	43
Tabla 3.15 Parámetros recomendados para ejecutar métodos químicos de control de sólidos	45

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto integrador hace referencia al estudio de técnicas para el control y tratamiento de sólidos de formación provenientes de las arenas productoras durante el proceso de extracción de hidrocarburos. Se plantea como objetivo principal realizar una revisión y análisis de las nuevas técnicas a nivel de subsuelo dirigidas a minimizar los problemas operacionales causados por la migración de sólidos de formación. La característica principal de este fenómeno corresponde a la invasión de partículas de pequeño tamaño al sistema de producción, estos sólidos se encuentran suspendidos en el medio poroso de la formación justo en el trayecto de los fluidos a producir que, por el movimiento de estos, son desplazados hasta ser atrapados en la garganta de los poros de la roca o su posterior su ingreso al pozo.

Si la migración de sólidos de formación no es prevenida o controlada a tiempo, las consecuencias pueden reflejarse en grandes problemas operacionales y económicos, asociados a la baja producción debido a la disminución de permeabilidad por el taponamiento de los poros de la arena objetivo que incluso puede representar la pérdida total del pozo, de igual forma existe la posibilidad de una obstrucción de las líneas de flujo y el desgaste de la vida útil tanto de los equipos del sistema de levantamiento artificial de fondo de pozo como de las facilidades de producción en superficie.

Para el análisis de la problemática, inicialmente se aborda la forma de clasificar los sedimentos en base a la escala de Wentworth, con ello, se identifica el rango aproximado de las partículas que tienden a migrar, el tipo de roca del que provienen y las características mineralógicas de los sólidos de formación causantes del arenamiento y migración de finos. En segunda instancia se estudia las condiciones físicas que intervienen en la producción de las partículas. A continuación, se estudia las metodologías que permitan predecir la existencia de migración de sólidos de formación. Una vez identificado el tipo de sólido se describen las técnicas orientadas al control y tratamiento del problema a nivel de pozo. Finalmente, se compara las condiciones actuales de un caso de estudio, perteneciente a un campo petrolero ecuatoriano, con los métodos descritos, seleccionado el más prometedor para el respectivo análisis de su aplicabilidad.

Las limitaciones del trabajo consisten en la falta de información de campo y la ausencia de una forma para comprobar la eficiencia de los métodos descritos, debido a que, al ser un proyecto en su totalidad de revisión bibliográfica las técnicas presentadas están basadas en los resultados obtenidos por otros autores que lograron presenciar o estudiar la aplicabilidad de estas dentro de campos petroleros o en laboratorio.

1.1. Descripción del problema

El arenamiento y la migración de finos en campos petroleros disminuyen la capacidad productiva del pozo e incluso pueden conllevar a la pérdida del mismo; la migración de finos es de las causas principales del daño de formación y el arenamiento genera problemas en instalaciones tanto dentro del pozo como en superficie, además de un impacto económico a la compañía operadora; este problema que trataremos como invasión de sólidos de formación surge en el momento en el que el pozo empieza a producir, estos sólidos pueden ser originados in situ o por operaciones de campo; existen métodos que se pueden implementar para minimizar el problema.

1.2. Justificación del problema

El estudio de nuevas técnicas desarrolladas para el control y el tratamiento de sólidos de formación es pertinente, ya que este problema provoca tanto una disminución en la producción de crudo, por el daño de formación y el arenamiento, como pérdidas económicas a las compañías operadoras de cada campo; este estudio proveerá de un abanico más amplio de técnicas para minimizar los problemas operacionales, lo cual ahorraría tiempo y costos a las compañías al usar tecnología más reciente. Este estudio daría la seguridad de estar basada en investigaciones confiables y recientes enfocadas a este problema.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar una revisión y análisis de las nuevas técnicas a nivel de subsuelo dirigidas a la disminución de los problemas operacionales causados por la producción de sólidos de formación.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las características mineralógicas y granulométrica de los diferentes tipos de sólidos de formación y las condiciones físicas que intervienen en su migración.
- Estudiar las metodologías que permiten la predicción de la migración de sólidos de la formación.
- Describir las técnicas orientadas al manejo de la producción de sólidos de formación.
- Comparar los métodos estudiados y realizar un análisis de factibilidad técnica para determinar el método más idóneo para aplicar en un caso de estudio en algún campo petrolero ecuatoriano.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Fundamentos teóricos

1.4.1.1. Producción de sólidos de formación.

Para abordar el tema de los sólidos de formación es necesario identificar primero la clasificación de sedimentos que contiene una formación, siendo las rocas clásticas y no clásticas. Centrándonos en la primera, se puede definir a los sólidos clásticos como partículas no consolidadas creadas por la meteorización y erosión de fragmentos de rocas de granos de distintos tamaños por precipitación química de soluciones acuosas o por secreciones de organismos, siendo transportadas por el agua, el viento o los glaciares. La destrucción mecánica genera preferentemente gravas, arenas, limos y en ocasiones, partículas de tamaño de arcillas (Márquez Vera, 2008).

Se utiliza el término “producción de sólidos” en lugar de “producción de arena” debido a que este último implica que solo las areniscas frágiles o poco consolidadas son las que están susceptibles a ser producidas. La producción de sólidos de formación abarca a toda partícula susceptible al movimiento debido al flujo de los fluidos extraídos durante las operaciones de producción de hidrocarburos (**Figura 1.1**), enfocándonos principalmente en dos fenómenos, arenamiento y migración de finos.

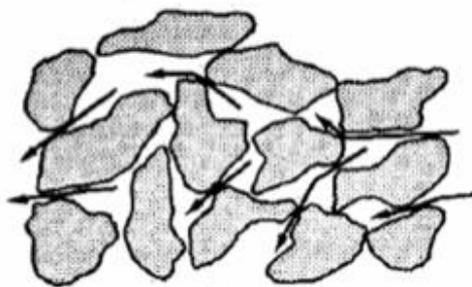


Figura 1.1 Movimiento de los granos de arena causado por el flujo de fluidos
(Servimeca Industrial S.A.S Colombia, s.f.)

En ambos fenómenos existe una migración de sólidos de formación que pueden ser originadas tanto in situ como por operaciones de campo, estas partículas se encuentran suspendidas en el espacio poroso de la roca, justo en la trayectoria de los fluidos (Noguera Montalva, 2011). Por lo que, debido al movimiento de los fluidos desde el yacimiento hacia el pozo se origina el desprendimiento de los granos de la formación a causa de las fuerzas de arrastre y los gradientes de presión, estos sólidos pueden fluir hasta ser retenidos en el cuello de los poros, ocasionando taponamiento, o ingresando al sistema de producción (Grajales Herrera & Hoyos Cifuentes, 2018).

Se diferencian por el diámetro de los sólidos migrantes, el arenamiento se caracteriza por el movimiento de los sólidos comúnmente denominados arena, que corresponde a toda partícula con un rango de tamaño entre 2 y 0,0625 mm de diámetro. Mientras que, en la migración de finos abarca a toda partícula con un tamaño menor a 0,062 mm (62 micras), capaces de pasar a través del tamiz #200 (Suquilanda Duque & Vallejo Tixicuro, 2015).

Generalmente se producen sólidos durante diferentes etapas en la vida de un pozo. Estos sólidos provenientes de la roca pueden ser originados al momento de perforar un pozo y ser transportados con los fluidos del yacimiento. Identificando qué tipo de sólido se están produciendo y qué parte del comportamiento de la producción puede haberlo causado es un buen inicio para pensar en el control de la producción de los sólidos y luego en la acción de remediación (Ocaña Proaño, 2012).

1.4.1.2. Clasificación de los sólidos de formación según la información granulométrica.

Un análisis granulométrico consiste en la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica (Sanchez Bone, 2014).

Según (González Amado & Ramírez Ávila, 2016) se puede determinar el tamaño de grano mediante la realización, en un laboratorio, de pruebas mineralógicas y granulométricas a los núcleos tomados de la formación objetivo, estas pruebas son hechas previa a la instalación de los mecanismos de control de sólidos de formación. Hay dos formas recomendadas para determinarlo, mediante reportes de granulometría o mediante información histórica.

La clasificación de los sólidos de formación no toma en cuenta las propiedades físicas, en cambio, se clasifica en base a las dimensiones del material (**Figura 1.2**), obteniendo así cuatro categorías con las que se puede esquematizar a los sólidos, teniendo a la clasificación coloidal (partículas menores a 2 micrones), limos (partículas entre 2 a 74 micrones), arenas (siendo partículas entre 74 a 2000 micrones) y grava (abarcando partículas de tamaño mayor a 2000 micrones).

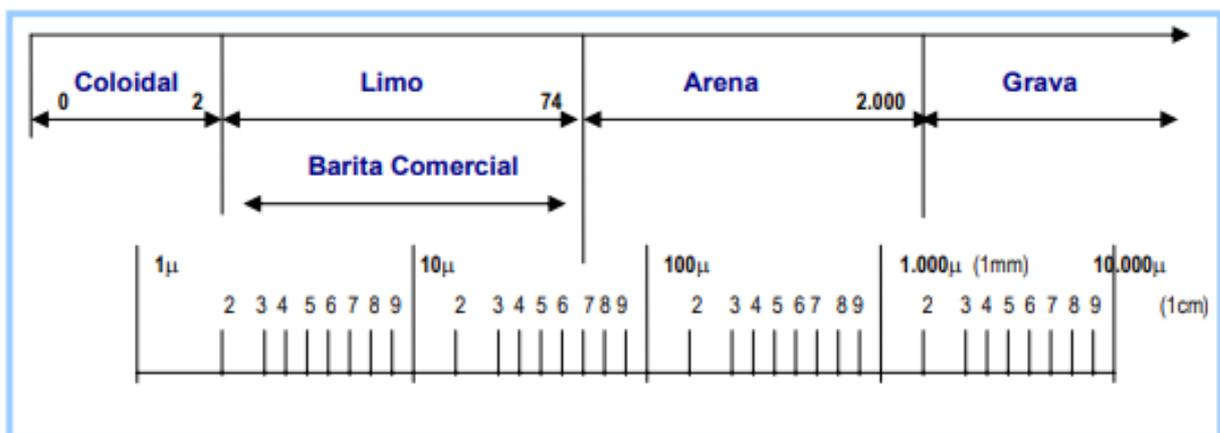


Figura 1.2 Clasificación de los sólidos según el tamaño
(García González, 2003)

1.4.1.3. Mineralogía de los sólidos de formación

La mayoría de las areniscas contienen un cierto porcentaje de arcillas autógenas en su composición mineral. Estas arcillas pueden estar presentes formando parte de la matriz, revistiendo los poros o en el interior de ellos. Las partículas de arcilla a menudo son encontradas en las uniones de los granos de arena, y en particular se concentran cercanas a los lentes de arcillas. Hay dos categorías principales de arcillas, siendo arcillas detríticas, que son sedimentadas por un proceso físico, y arcillas diagenéticas, que son sedimentos de arcilla que experimentan cambios físicos y químicos durante la litificación y compactación (Corrales Tisalema, 2013).

En formaciones productoras de hidrocarburos, por lo general se encuentran dos tipos de finos; finos pertenecientes a material arcilloso que corresponden a hidratos de silicatos de aluminio, existiendo en cuatro tipos de arcillas como lo son la Esméctita, Illita, caolinita y Clorita; y material no arcilloso tales como Cuarzo, Feldespatos y otros, que se remueven por efectos de cambios y desplazamiento en la fase humectante (Hernández Espinosa & Rojas Cuellar, 2016).

1.4.1.4. Causas para la migración de sólidos

Es un problema que usualmente se presenta en yacimientos poco profundos con arenas poco consolidadas, debido a que estos están ubicados en lechos de arena (Quisnancela Ortiz, 2014). Aunque, se ha demostrado que también existe la posibilidad de encontrar problemas de arenamiento en formaciones con profundidades mayores a los 12000 ft (Grajales Herrera & Hoyos Cifuentes, 2018).

Dentro de las causas para la producción de arena tenemos el flujo de los fluidos desde el yacimiento siendo la causa mayor, también asociado a las altas tasas de producción. El factor geológico en las formaciones poco consolidadas juega un papel importante ya que abarca tanto la cohesión del material, siendo la cementación o adherencia entre las partículas de la formación, como el grado de consolidación natural, correspondiente a las fuerzas de restricción las cuales buscan mantener los granos de arena en su lugar; estas surgen del grado de litificación, la fricción intergranular, la fuerza de gravedad y las fuerzas capilares. La presión de poro ayuda a alivianar en cierto grado los esfuerzos sobre los granos de arena (Montesdeoca Lamar, 2008).

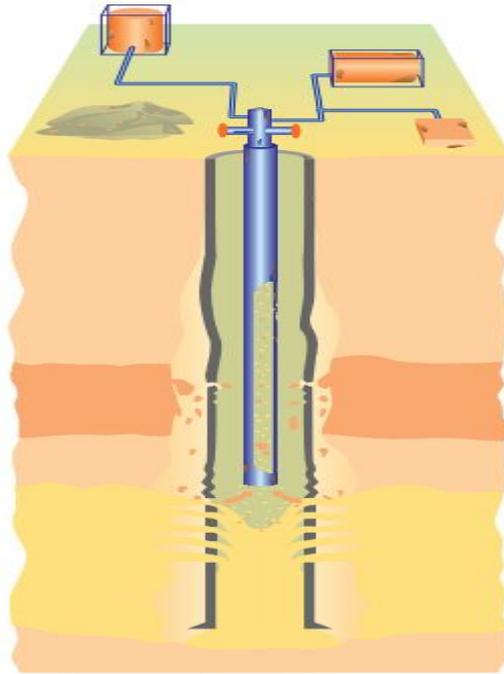
Desde otro punto de vista, la migración de partículas finas se produce en dos etapas, la primera es el desprendimiento de las partículas por su sensibilidad a los fluidos, y la segunda es el transporte de las partículas por el fluido. El efecto del desprendimiento se produce por incompatibilidad entre los fluidos propios de la formación y aquellos que son ajenos, siendo producidos e ingresados desde superficie, que tienden a reducir las fuerzas hidrodinámicas provocando que partículas de entre 2 a 40 micrones sean desprendidas. Mientras que el efecto de migración ocurre debido a que las partículas son transportadas a través del medio poroso hasta ser atrapadas en la garganta de los poros, reduciendo la permeabilidad, o permitiendo su paso al pozo por medio de los hidrocarburos que están siendo extraídos durante la producción (Polo Padilla & Figueroa Orejarena, 2013).

1.4.1.5. Problemas asociados con la producción de sólidos

En primer lugar, se consideran los problemas operativos relacionados con la producción de arena, estos varían desde costosos problemas de manejo de arena hasta la pérdida completa de una zona productiva o incluso la posibilidad de perder el control del pozo debido a la erosión del equipo de superficie. Al mismo tiempo, la arena producida reduce la tasa de producción y cualquier otro tipo de equipo de control de arena instalado hace lo mismo (Matanovic et al., 2012).

Dentro de la producción de sólidos también se debe mencionar a las partículas finas, pues están siempre presentes en las formaciones petroleras, tanto en las operaciones de campo como en las interacciones fluido – fluido y roca – fluido, estas partículas migran a través del medio poroso, quedan atrapadas en las aberturas de los poros, llenan y tapan los espacios porosos de la formación (Liu & Civan, 2007).

En la figura 1.3 podemos observar que los peligros de la producción de arena. Pueden formarse huecos detrás de la tubería, lo que provoca el hundimiento de la formación y el colapso del revestimiento. El pozo también puede llenarse de arena y dejar de fluir. O el equipo de superficie puede sufrir daños catastróficos por erosión o taponamiento (Carlson et al., 1992).



**Figura 1.3 Problemas de la producción de arena en un pozo
(Carlson et al., 1992)**

1.4.1.6. Técnicas para predecir la producción de sólidos de formación.

De acuerdo con (Subbiah et al., 2020), la producción de arena normalmente se manifiesta debido a la falla de la roca arenisca. En ocasiones, la falla solo se manifiesta en etapas posteriores de la producción de hidrocarburos asociada al agotamiento. Por lo tanto, es esencial encontrar la causa raíz del mecanismo de falla y las rutas para evitarlo. Para lograr este objetivo, se requiere un análisis adecuado de predicción de la producción de arena utilizando un modelo geomecánico. La selección de la metodología y la tecnología será clave para la precisión de la predicción, el análisis y la solución. Además, en su artículo explica que en la mayoría de las técnicas disponibles para modelar la producción de arena se basan en experimentos de laboratorio o modelado teórico de la producción de arena u observaciones de campo y la metodología de predicción de la producción de arena se puede dividir en dos enfoques: modelos analíticos o semi-analíticos y modelos numéricos.

1.4.2. Antecedentes

1.4.2.1. Técnicas desarrolladas para el control de producción de arena

En la industria hay métodos muy bien conocidos para el control de arena, sin embargo, con el avance de la tecnología es necesario el rediseño y mejoramiento de

estos. Por ejemplo, en el trabajo de Christine Fischer, Vernon Constien y Carla Vining, se propone un nuevo método de dimensionamiento del paquete de grava que se basa en el "tamaño efectivo de la formación" (Formación d50 / Coeficiente de uniformidad) así como en el tamaño de poro del paquete (Fischer et al., 2016).

Los desafíos históricos y la alta tasa de fallas del uso de pantallas independientes en pozos entubados y perforados empujaron a varios operadores a considerar el empaque de grava en pozo entubado o el frac-pack como la mejor opción de completación para el control de arena. A pesar de la fiabilidad de estas opciones, son más caras que la completación de pantalla independiente. Dado que varios desarrollos no están diseñados para empaque de grava en pozo entubado o frac-empaque, se recomiendan métodos de control de arena específicos para pozos entubados y perforados (Soroush et al., 2020).

Algunos operadores optarán por un tratamiento químico como la consolidación y / o aglomeración de arena con el objetivo de buscar una solución más duradera en comparación con los métodos mecánicos de control de arena, la consolidación química de arena (SCON) y la aglomeración de arena se han identificado como tratamientos químicos efectivos para controlar la producción de arena en el fondo del pozo; durante las últimas décadas, hubo alrededor de 20 trabajos de tratamiento SCON y 3 trabajos de aglomeración de arena que se llevaron a cabo en varios campos de Malasia con diferentes proveedores de servicios y productos químicos. Las tasas generales de éxito para la consolidación y aglomeración de arena son 75% y 66% respectivamente (Hassan et al., 2020).

1.4.2.2. Técnicas aplicadas para el control de la migración de finos.

Existen alternativas para el control y tratamiento de la migración de finos que afectan la productividad del pozo, entre ellos se puede nombrar el uso de la nanotecnología, en el artículo presentado por Tianping Huang, James B. Crews y John Robert Willingham en el 2008 se plantea el uso de esta para fijar las partículas finas migratorias mediante la interacción entre las partículas finas migratorias presentes dentro de la formación y las nanopartículas asociadas con un tratamiento de paquete de apuntalante (Huang et al., 2008).

Otro artículo presentado en el año 2011 vuelve a mostrar a los nanofluidos como una opción muy viable para mitigar la migración de finos: se utilizan MgO, SiO₂ y Al₂O₃ para investigar sus efectos sobre el movimiento de los finos. Los resultados indican que los finos podrían adherirse a los granos dificultando su migración cuando los materiales porosos ya están empapados con nanofluidos. Además, para comprobar los mecanismos de esta técnica de remediación, se estudió el efecto de las concentraciones de nanopartículas y los caudales de fluido en el medio sobre el desprendimiento de finos (Habibi et al., 2011).

Un trabajo presentado este año desarrolla un agente de control de finos eco-amigable que estabiliza los finos por coagulación y floculación, este químico se puede utilizar después de la acidificación, tratamiento de recuperación mejorada, en pozos de producción e inyección (Ibrahim et al., 2020).

Un método muy interesante es la aglomeración química de arena, el cual alterando el potencial zeta de las formaciones areniscas, presenta una mejor opción para el tratamiento de pozos con producción de finos de formación sin el problema relacionado de la reducción de la permeabilidad (Mendez et al., 2011).

Por otro lado, Hanafy y Nasr-EI-Din desarrollaron una metodología para localizar, cuantificar y describir el daño resultante de la migración de finos y su estimulación en formaciones de arenisca y examinar el impacto del contenido de arcilla y su naturaleza en el proceso de estimulación (Hanafy & Nasr-EI-Din, 2018).

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA

La siguiente metodología tiene la finalidad de ser una herramienta para los Ingenieros al momento de identificar que el potencial de un pozo este sientto afectado por problemas como arenamiento y migración de finos. La selección preliminar de un mecanismo de control de sólidos de formación se realiza en base al análisis de variables granulométrica, información del pozo y recomendaciones para cada método, es por ello, que la correcta identificación del tipo de sólido que está filtrando permite proponer la aplicabilidad de diferentes mecanismos para atenuar la invasión de partículas.

2.1. Caracterización mineralógica y granulométrica de los sólidos de formación que tienden a migrar.

Para la selección de un mecanismo de control de sólidos de formación nos hemos basado en dos variables granulométricas, la primera es el tamaño de grano, que permite realizar una correcta identificación de los sólidos de formación, para ello, se emplea la escala propuesta por Udden-Wentworth (Tabla 2.1), que es una escala granulométrica utilizada para la clasificación de los sedimentos en base al rango de tamaño de grano. El segundo factor, corresponde al coeficiente de uniformidad (Tabla 2.2) que es el cociente entre los percentiles de una prueba granulométrica, que nos permite caracterizar la formación objetivo (Beltrán Ladino & Carvajal Hernández, 2019).

De la clasificación por tamaño de grano se obtienen tres tipos principales de sedimentos como lo son; grava, arena y coloidal, dentro de esta última se abarca los tanto los limos como partículas de arcilla, además se conoce del tipo de roca del que provienen. Considerando que las zonas productoras de hidrocarburos corresponden a formaciones compuestas por areniscas y lutitas, nos enfocamos en los sedimentos característicos de estas formaciones, siendo la clasificación arena y coloidal, que corresponden a las partículas responsables de los problemas de arenamiento y migración de finos.

**Tabla 2.1 Clasificación de los sedimentos según Udden-Wentworth
(García y Preciado, 2020)**

Tamaño del clasto o cristal		Sedimentos	Tipo de Roca
mm	µm		
256	-	Bloques	Conglomerados
64	-	Grava	
16	-	Guijarro	
4	-	Granos	
2	1001 - 2000	Arena muy gruesa	Areniscas
1	501 - 1000	Arena gruesa	
0.5	251 - 500	Arena	
0.25	126 - 250	Arena fina	
0.125	62 - 125	Arena muy fina	
0.062	32 - 62	Limo grueso	Lutitas
0.031	17 - 31	Limo medio	
0.016	9 - 16	Lodo / Coloidal	
0.008	5 - 8	Limo muy fino	
< 0.004	< 4	Arcilla	

**Tabla 2.2 Caracterización de la formación productora según el coeficiente de uniformidad
(Beltrán Ladino & Carvajal Hernández, 2019)**

Coeficiente de uniformidad	Característica
$U < 3$	Uniforme
$3 < U < 5$	No uniforme
$U > 5$	Altamente no uniforme

El problema de arenamiento consiste en el movimiento de partículas entre 2 y 0.063 mm. “Dentro de los sólidos de la clasificación arena pueden incluir partículas de arena, caliza, carbonatos, sólidos de perforación, y partículas de barita gruesa” (García González, 2003). Los granos de arena pueden ser angulares, subangulares o redondeados, la mayor parte están formadas por cristales de cuarzo, aunque existen

arenas formadas por granos finos de olivino, de carbonato de calcio y hasta de yeso (Robledo Rodríguez, 2012).

Por lo general se encuentran dos tipos de finos; pertenecientes a material arcilloso que corresponden a hidratos de silicatos de aluminio, que generalmente se encuentran en cuatro tipos de arcillas como lo son la esméctita, illita, caolinita y clorita, y material no arcilloso tales como cuarzo, feldespatos, sílice, carbonatos, zeolitas, sales, micas y amorfa, que se remueven por efectos de cambios y desplazamiento en la fase humectante (Hernández Espinosa & Rojas Cuellar, 2016). Sin embargo, cuando nos referimos a finos consideramos tanto la clasificación de limo como de arcillas.

Los limos son partículas que tienen un tamaño que varía entre 0.063 y 0.004 mm. “Su clasificación incluye a las calizas, arena fina, carbonatos finos y la barita” (García González, 2003). Están compuestos por sedimentos de rocas preexistentes. El limo inorgánico está compuesto sólo por polvo rocoso. Y cuando se presenta en forma de roca se denomina limolita y lutita, de acuerdo con su consolidación (Limo, s.f.).

Dentro de la clasificación de coloidal tenemos a las partículas menores a los 0.004 mm. “Estos sólidos incluyen a la bentonita y otras arcillas, sólidos de perforación muy finos como la caliza, arena y carbonatos, y barita fina” (García González, 2003). “Las arcillas son silicatos de aluminio hidratados. Su estructura está formada por capas tetraédricas de silicio-oxígeno y capas octaédricas de aluminio-oxígeno-hidroxilo” (Polo Padilla & Figueroa Orejarena, 2013). Poseen una forma laminar, suelen tener propiedades coloidales, tienen un comportamiento sensible a los cambios y pueden ser expansivas.

2.2. Condiciones físicas que intervienen en la producción de sólidos de formación.

2.2.1. Mecanismos físicos de arenamiento

De acuerdo con (Ahad et al., 2020), los problemas de producción de arena se agravan en areniscas débiles o semi-consolidadas, donde la producción de arena puede ocurrir con una pequeña caída o penetración de agua. Los cambios en las tensiones de las rocas debido al agotamiento de la presión del yacimiento pueden provocar la rotura

de las rocas, lo que lleva a la producción de arena en la fase posterior de producción. La presencia de agua (debido a la penetración de agua) agravará aún más la producción de arena debido al aumento de las fuerzas de arrastre, que movilizarán los granos de arena.

Para que se manifieste la producción de arena primero la roca debe fallar, por lo tanto, debemos comprender la naturaleza de la falla de la roca y la causa raíz (Subbiah et al., 2020).

2.2.1.1. Falla por cizallamiento: Cualquier estrés incremental sobre la roca incrementará la tensión, por lo que la roca comenzará a deformarse. Esta falla ocurre cuando el estrés desviador es alto y causa que grano a grano se desprenda y reoriente lo cual eventualmente se manifiesta como bandas de corte en la roca (Subbiah et al., 2020).

2.2.1.2. Falla por tracción: La falla de tracción no es un mecanismo de falla muy común en campo petroleros mientras están en producción. Este tipo de falla normalmente ocurre durante la descarga rápida del pozo (altas tasas de flujo), sin embargo, la falla por tracción no será capaz de generar un alto volumen de producción de arena (Subbiah et al., 2020).

2.2.1.3. Falla de unión: La falla de la unión es muy importante en una roca de cohesión débil. La fuerza de unión está relacionada con el tipo de material aglutinante y la presión capilar. Si la fuerza de arrastre del flujo de fluido in situ supera la fuerza de unión, se producirá arenamiento (Du et al., 2009).

2.2.1.4. Colapso de poros – falla volumétrica: Se da mayormente en formaciones de altas porosidades. El excesivo estrés hidrostático en la formación es el principal culpable por el colapso de poros, durante este proceso las partículas de granos han sido modificados (aflojados, torcidos y empujados hacia los vacíos). La consecuencia de esta falla es la reducción de la porosidad (Subbiah et al., 2020).

2.2.2. Producción de finos en formaciones de areniscas

De acuerdo con (Hibbeler et al., 2003), se puede afirmar que la migración de finos puede ocurrir por medios físicos o químicos y generalmente el proceso involucra tres condiciones:

- Los finos deben existir dentro de la red de poros de la roca.

- Debe haber un mecanismo que provoque la ruptura de la atracción o unión de los finos al sistema de poros.
- Debe haber un mecanismo de trampa cerca del pozo que mantenga los finos en su lugar, por ejemplo, puentes, atracción iónica y mojabilidad.

La salinidad, las tasas de flujo, el pH, la temperatura, saturación residual de petróleo, mojabilidad, polaridad del petróleo y flujo fraccional de petróleo y petróleo han sido estudiados experimentalmente por sus efectos en la aceleración de la formación de la migración de finos (Huang et al., 2008). Además, cuando están presentes fluidos inmiscibles en los espacios porosos, la humectabilidad de las partículas, la cantidad relativa de fluidos que fluyen a través de los poros y las interacciones químicas entre las partículas y los fluidos de formación también influyen fuertemente en el movimiento de las partículas (Rahman et al., 1994).

De acuerdo con (Hibbeler et al., 2003) entre los parámetros mencionados anteriormente, los siguientes han sido ampliamente analizados por su influencia en la producción de finos:

- **Altas tasas de flujo:** para cada formación existe una velocidad crítica que deberá ser suficiente para causar el movimiento de finos. Además, exponer un pozo a un cambio brusco de velocidad (choque de flujo) puede desalojar los finos.
- **Efecto de la mojabilidad:** los finos tienden a fluir en presencia del agua y el flujo de finos se da en el fluido que moja, siendo generalmente el agua el fluido mojante.
- **Intercambio iónico:** mientras la salinidad decrece, el pH incrementa in situ dado el intercambio de iones. Un incremento en el pH también puede ser inducido mediante el fluido inyectado. Como el pH incrementa, incrementa el potencial de superficie de los finos hasta la de-floculación y el desprendimiento ocurre.
- **Flujo turbulento en dos fases:** Este puede desestabilizar a los finos especialmente en la región cercana al pozo donde estos efectos son más grandes dado el flujo radial.
- **Tratamientos de acidificación:** estos pueden provocar la producción de finos creando precipitación, fragmentación de arcilla y desconsolidación dada la excesiva disolución de la matriz.

2.3. Metodologías para predecir la existencia de producción de sólidos de formación en los campos.

De acuerdo con (Subbiah et al., 2020), la mayoría de las técnicas disponibles para modelar la producción de arena están basadas en experimentos de laboratorio, modelos de producción de arena teóricos u observaciones de campo. Las metodologías para predecir la producción de arena pueden ser divididas en dos enfoques (i) analítico o semi - analítico (ii) modelos numéricos.

- **Metodología analítica:** Es la metodología más fácil de implementar y es la técnica más frecuentemente usada en la industria. Su entrada fundamental es un robusto modelo geomecánico, conocido como Mechanical Earth Model – MEM. La metodología analítica permite estimar la falla inicial de una arenisca.
- **Modelo numérico:** El modelo numérico es esencial para estimar adecuadamente los cambios de esfuerzos en el tiempo. A pesar del hecho de que el modelo numérico podría ser costoso y consumir tiempo, es algunas veces muy crítico para la ingeniería de diseño, especialmente para el desarrollo offshore y en aguas profundas. Hay muchas opciones para los métodos numéricos, tales como el Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FD), Boundary Element Method (BEM), Discrete Element Method (DEM), Discontinuous Deformation Analysis (DA), Bonded Particle Model (BPM) y Meshless Method (MM).

Así mismo para la predicción de la migración de partículas finas, desarrollar un modelo analítico, un modelo numérico y cotejar la información con las pruebas de laboratorio para una predicción lo más precisa posible, por ejemplo en el artículo de (Bedrikovetsky et al., 2012), se discute un modelo matemático que contiene la función de concentración de retención máxima de la velocidad del flujo que gobierna la liberación de partículas y se usa en lugar de la ecuación para

2.4. Técnicas usadas para controlar la producción de sólidos de formación.

Hoy en día existen varias formas de prevenir o controlar la producción de sólidos de formación a nivel de pozo. A continuación, se describen las técnicas usadas con mayor frecuencia en la industria.

2.4.1. Control de la tasa de producción

La siguiente técnica no es tan recomendable debido a que su ejecución suele implicar una disminución en el potencial de producción, sin embargo, puede ser utilizada dentro de los campos petroleros porque no requieren un conocimiento profundo de las características del pozo o fluidos para su aplicabilidad.

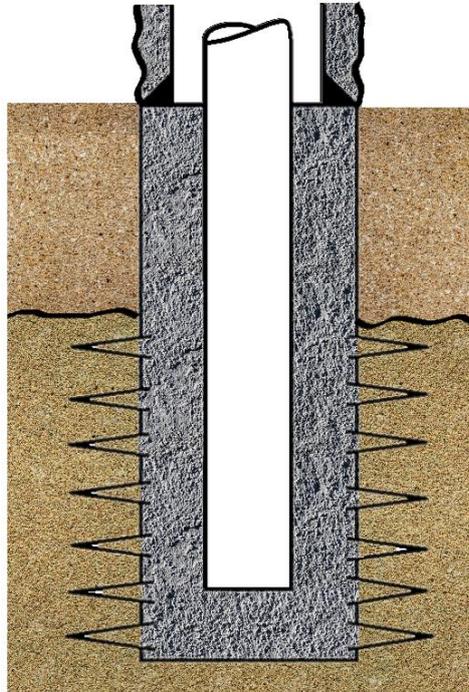
Se fundamenta en una reducción de la velocidad en el área cercana a la boca del pozo (en la cara de la arena) mediante la restricción de las tasas de producción, disminuyendo la caída de presión en la cara de la formación. Es una técnica de ensayo y error, es necesario repetir eventualmente el procedimiento a medida que cambian la presión del yacimiento, tasa de flujo y corte de agua (Ocaña Proaño, 2012). La gran ventaja de este método es que no es necesaria la utilización de equipos de fondo para control de arena por lo que no requiere operaciones de pesca cuando se decidan realizar intervenciones en el pozo, además de un completación más sencilla y económica (Suquilanda Duque & Vallejo Tixicuro, 2015).

2.4.2. Completación de pozos y métodos mecánicos

2.4.2.1. Disparos orientados

En yacimientos que presentan perfiles de esfuerzos anisotrópicos y probabilidades de producción de arena, la integración de un modelado de análisis de esfuerzos, técnicas de bajada de herramientas, nuevas herramientas de disparos y cargas, y la evaluación posterior a la detonación, permite la optimización de la terminación de los pozos en general, mejorando la productividad (Montesdeoca Lamar, 2008), en esta opción se realizan los disparos en la dirección más preferible con respecto al campo de tensión respecto al pozo, para obtener la máxima estabilidad, la perforación

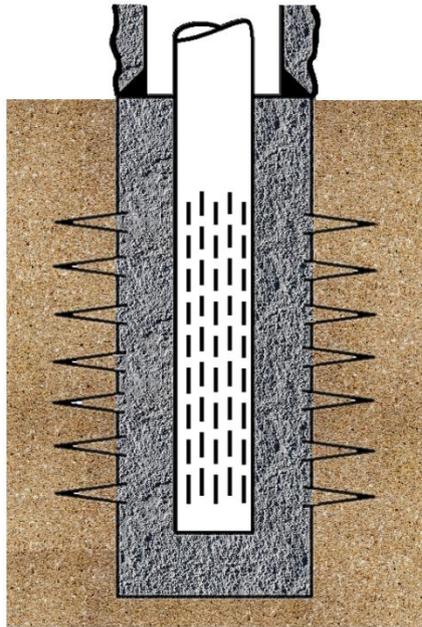
debe estar orientada de modo que se minimice la anisotropía de esfuerzos en un plano normal al eje de la cavidad (Tronvoll et al., 2004).



**Figura 2.4 Aplicabilidad de disparos orientados
(García y Preciado, 2020)**

2.4.2.2. Tuberías, rejillas o liners ranurados

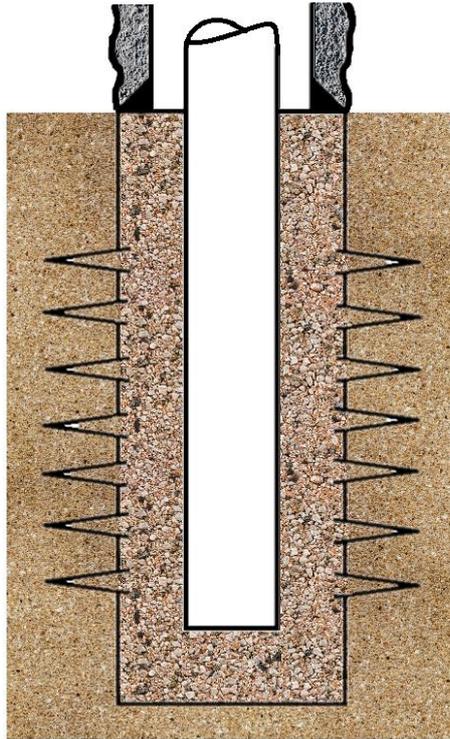
Es pionero dentro de los sistemas mecánicos para el control de arena por la facilidad de su instalación y principio de operación sencillo. Consiste en un liner (tubería que cuelga de una sección de revestimiento) con perforaciones, que se coloca frente a las formaciones productoras para retener partículas tipo arena. Algunos liner ranurados cuentan con mallas dentro de su configuración mejorando la eficiencia de este (González Amado & Ramírez Ávila, 2016). Este mecanismo debe emplearse, sólo si se tiene una arena bien distribuida y limpia, con un tamaño de grano grande. Los liners actúan como filtros de superficie entre la formación y el pozo, puesto que el material de la formación se acumula a la entrada del liner, previniendo la producción de sólidos de formación dependiendo del ancho de las ranuras (Montesdeoca Lamar, 2008).



**Figura 2.5 Aplicabilidad de un liner ranurado
(García y Preciado, 2020)**

2.4.2.3. Empaque de grava

Las empacaduras de grava son en la actualidad la más ampliamente utilizadas entre las técnicas de control de arena. Normalmente el único lugar en donde no es aplicable es en un pozo donde el diámetro interno de la tubería no permita su instalación (Montesdeoca Lamar, 2008). No es más que un filtro de fondo diseñado para prevenir la producción no deseada de arena de formación. Esta arena de formación se mantiene en su sitio debido a la acción de una arena de empaque con grava debidamente dimensionada, la cual, a su vez, se mantiene en su lugar con ayuda de una rejilla de medidas adecuadas (Sanchez Bone, 2014). El proceso de empaquetamiento con grava consiste en la instalación de un instrumento mecánico como una pantalla o un liner ranurado en un pozo y en la ubicación exacta de grava de un tamaño específico alrededor de la pantalla o del liner ranurado (Falconi Frías, 2010). Creando un sistema de dos fases de filtración por lo cual la grava en las perforaciones retiene la arena de la formación y la grava en el anular es retenida por el diámetro externo de la rejilla. Para maximizar la productividad, debe existir la mínima mezcla entre la arena de la formación y la grava para el empaquetamiento (Ocaña Proaño, 2012).

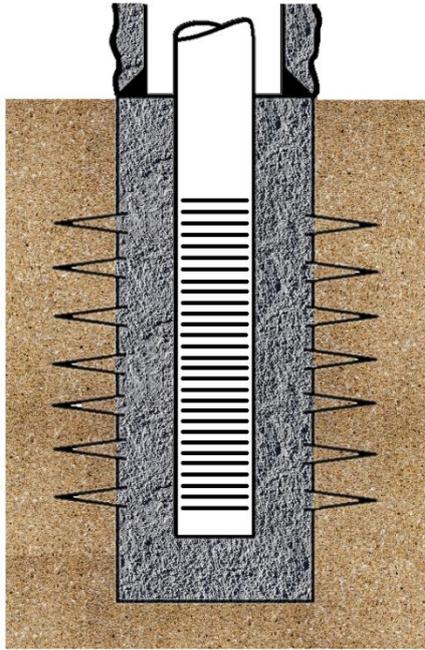


**Figura 2.6 Aplicabilidad de un empaque de grava
(García y Preciado, 2020)**

2.4.2.4. Mallas Premium

Las mallas premium están diseñadas para completaciones a hoyo abierto, pueden ser usadas con o sin empaquetamiento de grava. Tienen una amplia gama de tamaño de poro y metalurgia, permitiendo que se ajusten a una variedad de condiciones de producción (Montesdeoca Lamar, 2008). Los filtros de malla incluyen una o más capas de acero inoxidable tejido o alambre de malla envuelto alrededor de una tubería base, la malla se encuentra cubierta de una protección (Andrews, y otros, 2015).

Existen un gran número de filtros de arena, sin embargo, las mallas premium se caracterizan por proporcionar un mayor grado de retención en comparación a las mallas para arena convencionales, permitiendo que los sólidos de formación de menor tamaño, que estén migrando, sean retenidos (González Amado & Ramírez Ávila, 2016).

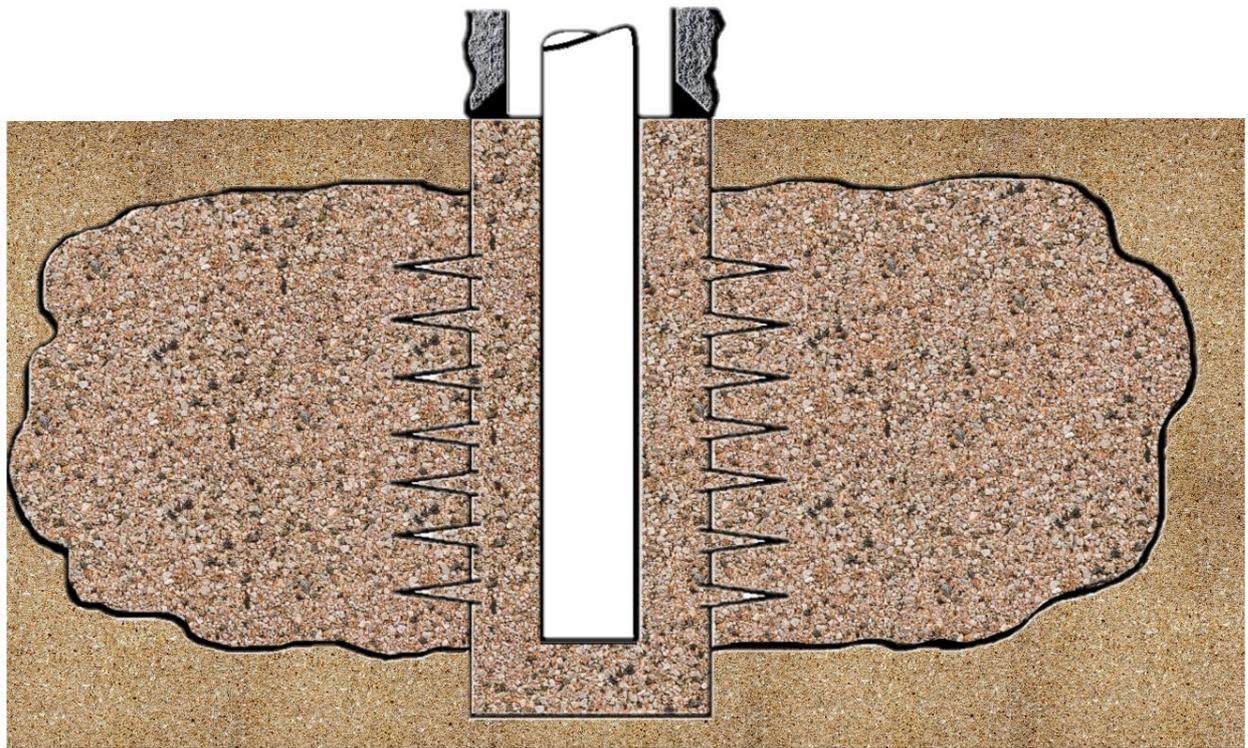


**Figura 2.7 Aplicabilidad de las mallas premium
(García y Preciado, 2020)**

2.4.2.5. Frac Pack

Es un método de control de arena primario, consiste en un tratamiento de fractura pequeño combinado con un empaquetamiento de grava a hueco cerrado. Este sistema proporciona una trayectoria de flujo para las capas de arena que no están expuestas a las perforaciones, mejorando de esta manera la recuperación de hidrocarburos. En formaciones pobremente consolidadas con alta permeabilidad y con un espesor relativamente grande, se prefiere este tipo de tratamientos (Ocaña Proaño, 2012).

Esta técnica combinada de estimulación y control de producción de arena es efectiva en una alta gama de formaciones con sólidos móviles, especialmente en yacimientos de baja permeabilidad. Además, se suma el hecho de que el daño asociado a completación de esta técnica sea típicamente menor al daño correspondiente a otros métodos de control de producción de arena (Montesdeoca Lamar, 2008).



**Figura 2.8 Aplicabilidad del Frac Pack
(García y Preciado, 2020)**

2.4.3. Métodos químicos aplicados en la formación

2.4.3.1. Consolidación química de arena

En este método se inyectan productos químicos como resinas plásticas, polímeros, nanopartículas, etc., en la formación no consolidada para unir los granos de arena, mejorando la resistencia a la compresión de la formación. Este método tiene un costo relativamente bajo en comparación con otras técnicas de control de arena y el tratamiento se puede realizar en un período de tiempo relativamente corto (Izurieta et al., 2020).

Hay varios ejemplos de aplicación de este método, conocido como SCON, entre ellos se tiene un artículo desarrollado en Ecuador en la arenisca M1, donde se muestran los resultados del método en cinco pozos diferentes, mientras se explica el flujo de trabajo que permitió la aplicación de la CSC en campo (Izurieta et al., 2020).

En los campos de Malasia se han llevado a cabo varios SCON en las últimas décadas con un 75% de éxito, y en el artículo presentado se analizan parámetros tales como: el tipo de completación, longitud de la perforación, permeabilidad de la formación, contenido de arcilla, preparación del pozo, temperatura de la formación y los métodos de colocación (Hassan et al., 2020), estos parámetros se mencionan también en otros trabajos realizados con este método.

Así mismo son varios los trabajos experimentales con la finalidad de mejorar el método y aplicarlo bajo otros parámetros, por ejemplo, en un trabajo realizado por (AlAhmari et al., 2020) se plantea el uso de la enzima de precipitación de carbonato inducida por ureasa (EICP), que es una técnica reversible y respetuosa con el medio ambiente para la consolidación de arena, su estudio aborda un método mejorado de EICP donde se agrega proteína y la técnica puede ser aplicable en reservorios de alta temperatura.

En los últimos años se ha mejorado la tecnología de aplicación de la consolidación química de arena utilizando materiales más innovadores, como las nanopartículas. Se ha demostrado que el empleo de nanopartículas en aplicaciones de control de arena es prometedor y un agente de consolidación atractivo, especialmente en condiciones de alta presión y temperatura (Alakbari et al., 2020). Por ejemplo, (Huang et al., 2008) planteó solucionar la migración de finos usando la interacción las partículas finas migrantes dentro de la formación y los nanocristales asociados con el tratamiento del paquete de propante, mientras que (Habibi et al., 2011) utilizó una columna empaquetada para estudiar el uso de estas tres nanopartículas: MgO, SiO₂ y Al₂O₃ para investigar sus efectos sobre el movimiento de los finos, y de manera similar (Ogolo et al., 2016) realizó algunos experimentos con las nanopartículas de Al₂O₃, concluyendo que tienen la capacidad de retrasar la migración de finos en arena a velocidades de flujo relativamente altas.

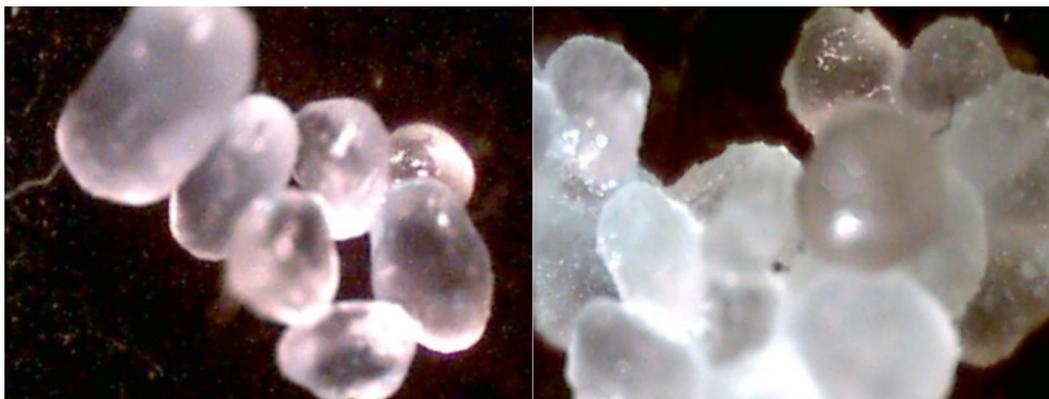


Figura 2.9 Recubierta de nanopartículas 20/40 U.S Malla de arena (Izquierda) Finos de la formación fijados sobre los granos de arena (Derecha) (Huang et al., 2008)

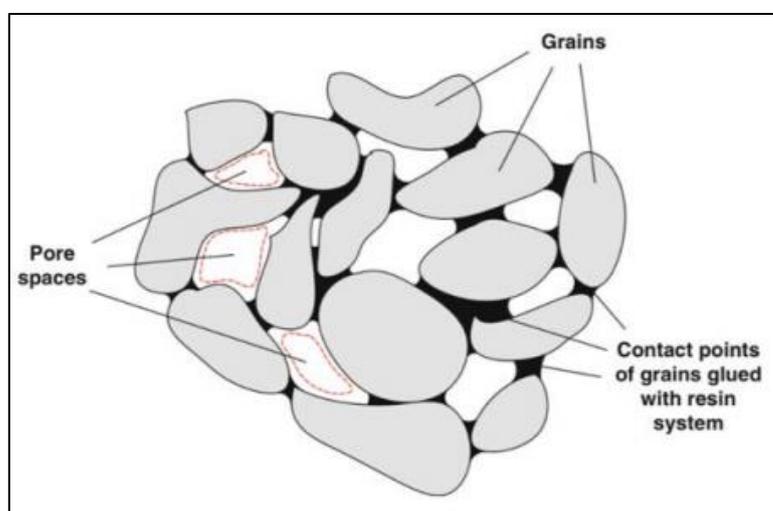


Figura 2.10 Químicos conectando los granos como tratamientos de consolidación de arena (AlAhmari et al., 2020)

2.4.3.2. Aglomeración de arena

Este método consiste en aumentar la atracción entre las partículas de arena a través de procesos como las interacciones de puentes de polímero y la neutralización de carga (Hassan et al., 2020), además los productos químicos no llenan las gargantas porales, por lo que no hay una pérdida significativa de permeabilidad (Dachanu wattana et al., 2020).

Este método fue aplicado en un campo ubicado en la parte noroeste de la costa de Sabah, Malasia; aquí se diagnosticaron los problemas de producción de arena, analizando la PSD de las muestras de arena; después del tratamiento el contenido finos

se había reducido significativamente del 94% al 9%, sin embargo existía un alta producción de arena (Hassan et al., 2020).

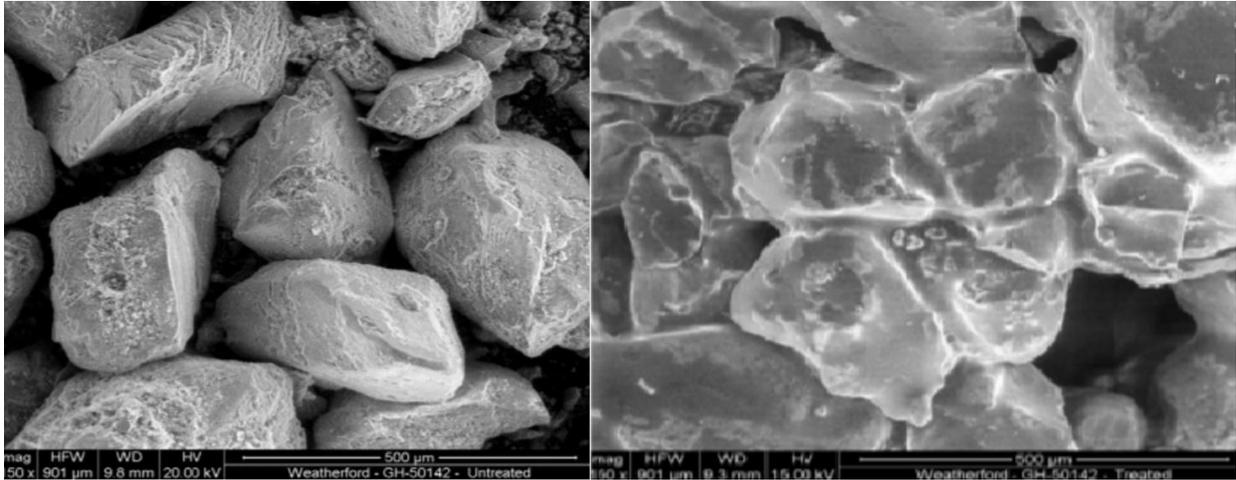


Figura 2.11 Microscopía electrónica de barrido sin tratamiento (izq) y con tratamiento (der)

(Mendez et al., 2011)

2.5. Caso de Estudio

Para el caso de estudio hemos utilizado la información publicada por (Sanchez Bone, 2014), nos centrándonos en la investigación granulométrica obtenida de tres pozos completados en la arena M1, para identificarlos los llamaremos Pozo 1H, Pozo 2H y Pozo 3H, de igual forma se lo hace con la arena objetivo, que a pesar de ser la misma varía en la información granulométrica y las profundidades, teniendo en cuenta esto, se las clasifica como M1A, M1B y M1C.

Los pozos están localizados a diferentes profundidades y se encuentran dentro del Campo Ginta, Bloque 16, en la provincia de Orellana perteneciente a la región amazónica, y es operado por la empresa Repsol Ecuador. Los tres pozos son horizontales. El Pozo 1H fue completado en el año 2003 y la arena objetivo se encuentra a una profundidad entre 9126 – 9129 pies. El Pozo 2H fue completado en el año 2001, la arena objetivo se encuentra a una profundidad entre 9140 – 9144 pies. Y el Pozo 3H fue completado en el año 2001, la arena objetivo se encuentra a una profundidad entre 9182 – 9188 pies.

**Tabla 2.3 Caracterización de la formación productora según el coeficiente de uniformidad
(García y Preciado, 2020)**

Información caso de estudio		Pozo 1H	Pozo 2H	Pozo 3H
Información granulométrica	Tamaño de grano de la formación (µm)	211 - 501	284 - 970	430 - 1549
	Clasificación de los sedimentos según el tamaño de grano (Wentworth)	Arena fina – Arena media	Arena media – Arena gruesa	Arena media – Arena muy gruesa
	Coefficiente de uniformidad de la formación (U)	1.6	1.9	1.7
	Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)	Uniforme	Uniforme	Uniforme

**Tabla 2.4 Parámetros de análisis para el método químico de control de arena.
(García y Preciado, 2020)**

Parámetros de análisis para el método químico de control de arena			Unidades	
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Areniscas no consolidadas	N/A	
	Permeabilidad de la formación	2662	mD	
	Tipo de completación	Pozo entubado perforado	N/A	
	Contenido de arcilla	≤5%	N/A	
	Temperatura de la formación	190°F	N/A	
	Longitud del intervalo de perforación	POZO 1H	90	
		POZO 2H	633.10	ft
POZO 3H		416.90		

Capítulo III

3. Análisis

3.1. Tamaño de los sedimentos implicados en la migración de sólidos de formación

Con el objetivo de identificar el tipo de sólido de formación y las condiciones para su movimiento se estudia la escala propuesta por Udden-Wentworth, con la cual se puede determinar una clasificación para los sedimentos en base al tamaño de grano (Tabla 3.1), además de incluir un leve estudio mineralógico y razones de migración para cada segmento, según lo investigado por diferentes autores. Permitiendo atribuir la migración de sólidos de formación a dos problemas muy conocidos en la industria, como lo son el arenamiento y migración de finos, el primero se caracteriza por el movimiento de partículas de la clasificación arena, abarcando arena desde muy gruesa (1000 micras) hasta muy fina (62 micras), conformadas por cristales de cuarzo, granos finos de olivino, carbonatos de calcio y yeso, en donde, las principales razones físicas para su movimiento son debido a fallas de cizallamiento, tracción, unión y volumétrica.

Mientras que el segundo problema, consiste en el movimiento de clastos de clasificación coloidal, que también suele ser denominado lodo, dentro de esta encontramos a los limos, que varían desde 5 a 62 micras, e incluso a las partículas de arcillas, que característicamente son partículas de tamaño menor a las 4 micras, se puede componer por material arcilloso (esmectita, illita, caolinita, clorita) y por no arcilloso (feldespatos, sílice, carbonatos, zeolitas, cales, micas, amorfa), su migración se puede atribuir a altas tasas de flujo, efecto de la mojabilidad, intercambio iónico, flujo turbulento en dos fases, tratamientos de acidificación.

Tabla 3.5 Clasificación de los sedimentos en base al tamaño, mineralogía y condiciones (García y Preciado, 2020)

Problemas de sólidos de formación	Tamaño de las partículas (µm)	Clastos sedimentarios		Mineralogía	Condiciones Físicas para la migración
Arenamiento	1001 - 2000	Arena	Arena muy gruesa	Arenas formadas por: <ul style="list-style-type: none"> • Cristales de cuarzo • Granos finos de olivino • Carbonato de calcio • Yeso 	<ul style="list-style-type: none"> • Falla por cizallamiento • Falla por tracción • Falla de unión • Falla Volumétrica
	501 - 1000		Arena gruesa		
	251 - 500		Arena media		
	126 - 250		Arena fina		
	62 - 125		Arena muy fina		
Migración de finos	32 - 62	Lodo / Coloidal	Limo grueso	Tipo arcilloso <ul style="list-style-type: none"> • Esméctita • Illita • Caolinita • Clorita 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas tasas de flujo • Efecto de la mojabilidad • Intercambio iónico • Flujo turbulento en dos fases • Tratamientos de acidificación
	17 - 31		Limo medio		
	9 - 16		Limo fino	Tipo no arcilloso <ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos • Sílice • Carbonatos • Zeolitas • Cales • Micas • Amorfa 	
	5 - 8		Limo muy fino		
	< 4		Arcilla		

3.2. Predecir la existencia de sólidos de formación en los campos

El proceso de producción de arena es muy complejo y debido a las variaciones en la naturaleza de los yacimientos en todo el mundo, es poco probable que se encuentre una metodología única que se aplique a todos los yacimientos o todas las etapas de producción de arena (Subbiah et al., 2020).

Tabla 3.6 Comparativa entre metodologías para la predicción de producción de sólidos de formación (García y Preciado, 2020)

	Metodologías analíticas	Modelos Numéricos
Aplicación	Analiza la fuerza de la tierra, esfuerzo y presión.	A veces es muy crítico para el diseño de ingeniería, especialmente para el desarrollo en alta mar y en aguas profundas.
Requerimientos	<ul style="list-style-type: none"> • Data disponible del pozo y de campo. • Propiedades mecánicas. • Esfuerzo de sobrecarga y la presión de poro. • Esfuerzos horizontales • Validación del modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simular las perturbaciones y los cambios en la tensión alrededor del pozo para todas las etapas antes de la producción.
Resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Determina la falla inicial de la arenisca y la migración de los granos de arena desagregados. <ul style="list-style-type: none"> • Ayuda a optimizar las completaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simula el comportamiento posterior a la falla. • Se ocupa de la evolución de la tensión y la deformación <ul style="list-style-type: none"> • Permite modelar partículas no esféricas. • Ayuda a encontrar dependencias de correlación entre valores finales y parámetros iniciales.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Es muy difícil de usar para realizar un análisis post falla. • Ignora la plasticidad natural de la roca. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede llegar a ser lento y costoso.

3.3. Resultados obtenidos de la aplicabilidad de los métodos de control de sólidos de formación

En el análisis de los métodos para el control de arena y la migración de finos, son varias las clasificaciones que se plantean, entre ellas los disparos orientados son considerados como un método geomecánico o un método pasivo, y de acuerdo con (Singh et al., 2014) este enfoque puede eventualmente conducir a una reducción del potencial de producción y, a medida que la presión del yacimiento disminuye o el corte de agua aumenta, puede eventualmente dictar la necesidad de cerrar el pozo debido a la producción excesiva de arena, y de acuerdo con (A. M. A. Rahman et al., 2019) la clave para el éxito de este método es principalmente un buen análisis de la litología de la formación y las propiedades de la roca.

Aplicación

De acuerdo con (Tronvoll et al., 2004):

- En pozos de alta productividad, ya que las velocidades de flujo restringidos pueden hacer que los filtros mecánicos y el empaque de grava resulten imprácticos o antieconómicos.
- En completaciones sin cedazo, pues previenen la producción de arena, ya que maximizan la estabilidad del túnel dejado por los disparos dentro de la formación.

Ventajas

- En yacimientos pobremente consolidados y formaciones con grandes contrastes creados por ambientes tectónicos complejos, en estos casos los disparos que apuntan a un plano de esfuerzo mínimo en sectores estables alrededor de un pozo ayudan a reducir o eliminar las fallas de disparos y el influjo subsiguiente de arena (Tronvoll et al., 2004).

Desventajas

- Baja confiabilidad en el corto y largo período, ya que provoca constantes operaciones de reacondicionamiento no planificadas para limpieza de arena y reemplazo de levantamiento artificial (Izurietta et al., 2020).

Tabla 3.7 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de los disparos orientados (García y Preciado, 2020)

Técnica: Disparos orientados		Unidades
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Formaciones débilmente consolidadas o con grandes contrastes de esfuerzos N/A
	Permeabilidad de la formación	- mD
	Tipo de pozo	Verticales y horizontales (más estable) N/A
	Rango de tamaño de grano (formación)	- μm
	Clasificación de rango de tamaño de grano de arena (Wentworth)	- N/A

El liner ranurado es de los mecanismos mecánicos más empleados en la industria para el control de sólidos de formación, debido a su fácil instalación y bajos costos en comparación a otros mecanismos (Tianjin Elegant Technology). Esto se puede respaldar con el análisis realizado por (González Amado & Ramírez Ávila, 2016), en donde, de los 116 pozos identificados, 65 fueron completados con este mecanismo, evidenciando una clara tendencia a optar por liners ranurados como sistema de control de sólidos de formación, además, se puede observar que este método sigue siendo seleccionado en la actualidad por sus buenos resultados. Cabe destacar, que el liner ranurado es aplicado como mecanismos para partículas entre 62 a 1000 micras, lo que corresponde solo a sólidos de la clasificación arena, según la escala de Udden-Wentworth abarca desde arena muy fina hasta arena gruesa, categorizando a este método como una solución para el problema de arenamiento.

Además, el liner ranurado puede ser utilizado forma autónoma o acompañado de otros mecanismos, como lo son el empaque de grava y malla para arena, con la finalidad de aumentar la eficiencia del control de sólidos de formación. Según (Tianjin Elegant Technology) en formaciones consolidadas son usadas para estabilizar el hoyo y proporcionar un área grande de flujo, mientras que, en formaciones de arena no consolidada, con empaque con grava o tamaños de granos grandes, las tuberías ranuradas de amplitud mínima proporcionan controles de arena efectivos y un flujo continuo de los fluidos de producción. Además, es necesario considerar que existen otros parámetros importantes al momento de la selección de un liner ranurado, como lo son las ranuras, siendo; el tipo, tamaño, calidad y patrón de distribución.

De acuerdo con (González Amado & Ramírez Ávila, 2016) y (Ocaña Proaño, 2012), para la utilización de un liner ranurado se debe considerar los siguiente;

Aplicación:

- Esta técnica puede utilizarse con o sin empaque de grava dependiendo del tipo de formación, consolidación y uniformidad.
- Este mecanismo debe emplearse sólo en formaciones de permeabilidad relativamente alta, si se tiene una arena bien distribuida y que contengan poca o ninguna arcilla, con un tamaño de grano grande, porque de lo contrario terminará taponándose.

Ventajas:

- Tiene una fácil Instalación, ya que se puede instalar en los zapatos del revestimiento directamente y no necesariamente desde la superficie.
- Representa bajos costos de instalación,
- Es ampliamente usado por su rigidez e integridad mecánica.
- Se le atribuye un principio de operación sencillo, que consiste en puentear la arena en las ranuras evitando que ingrese en las líneas de producción con los fluidos de la formación.

Desventajas:

- Hay una alta posibilidad de corrosión de las ranuras antes de que ocurra el puenteo.
- Es menos efectivo porque las ranuras tienden al taponamiento que puede deberse a la presencia de arcilla en la formación, si el tamaño de las partículas de arena es amplio y/o diverso, e incluso si el pozo tiene una alta productividad, en donde, se puede acompañar de caídas elevadas en la presión.
- Generalmente la productividad inicial es buena, sin embargo, posterior existe una declinación de la producción.
- En caso de existir derrumbes en formaciones parcialmente consolidadas o no consolidadas, puede existir una reducción de la permeabilidad.
- Tiene menos área de flujo disponible por limitaciones de anchura de las ranuras.

**Tabla 3.8 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de un liner ranurado
(García y Preciado, 2020)**

	Técnica: Liner ranurado		Unidades
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Formaciones consolidadas o no consolidadas	N/A
	Tipo de completación	Con o sin empaque de grava	N/A
	Permeabilidad de la formación	Permeabilidad relativamente alta	mD
	Tipo de pozo	Horizontales	N/A

Rango de tamaño de grano (formación)	62 - 1000	μm
Clasificación de rango de tamaño de grano de arena (Wentworth)	Arena muy fina – Arena gruesa	N/A
Coefficiente de uniformidad de la formación (U)	< 1.5	Adimensional
Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)	Uniforme	N/A

Las empacaduras de grava han demostrado dar buenos resultados en una mayor cantidad de pozos que cualquier otra técnica. Normalmente el único lugar en donde no es aplicable es en un pozo donde el diámetro interno de la tubería no permita su instalación (Montesdeoca Lamar, 2008). Sin embargo, al contrastar con los expuesto por (González Amado & Ramírez Ávila, 2016), se observa que las completaciones con empaque de grava ocupan un segundo puesto, sirviendo para mitigar la migración de partículas en un rango entre 126 a 1000 migras, que similar al caso del liner ranurado, solo abarca sedimentos de la clasificación arena, y en comparación, la grava no es recomendado para partículas de arena muy fina.

Las empacaduras de grava se diseñaron típicamente para controlar la producción de arena, sin embargo, a medida que los finos comienzan a migrar y a dañar la matriz de la grava, los esfuerzos a menudo se centran en eliminar los finos de la grava en lugar de prevenir la producción de finos en sus fuentes, además un supuesto común en la industria es que, para las completaciones de control de arena, es mejor que los finos de la formación migren a través del paquete de apuntalante. La formación del yacimiento, sin embargo, proporciona un suministro constante de partículas finas y sueltas que continúan ingresando al paquete con la producción de fluidos. Debido a que no todas las partículas de formación tienen el mismo tamaño, algunas son lo suficientemente pequeñas como para migrar a través del paquete. La geometría compleja de la garganta de los poros y el tamaño de partícula variable pueden causar puentes y, como resultado directo, pueden ocurrir taponamientos y causar daños al apuntalante o al paquete de grava (Nguyen et al., 2005).

En base a lo expuesto por (González Amado & Ramírez Ávila, 2016), (Ocaña Proaño, 2012) y (Montesdeoca Lamar, 2008), se puede decir que para el empaque de grava se utilizan en base a los siguientes parámetros;

Aplicación

- Se suele aplicar los empaques con grava en arenas no consolidadas que requieran altas tasas de flujo
- Puede ser aplicado tanto a hoyo revestido, mediante una combinación de rejilla y grava, como a hoyo abierto ampliado, que implica perforar por debajo de la zapata o cortar el revestimiento de producción a la profundidad de interés, repasar la sección del hoyo abierto, ampliándolo al diámetro requerido, para luego colocar una rejilla frente al intervalo ampliado y posteriormente circular la grava al espacio entre el liner y el hoyo ampliado.

Ventajas

- Permite dar estabilidad a la formación causando el mínimo impacto a la productividad, la cual se puede maximizar existe la mínima mezcla entre la arena de la formación y la grava para el empaquetamiento.
- Realizando un buen empaque de grava, el movimiento de arena en el pozo puede ocurrir únicamente como partículas individuales.
- Tiene mayor eficiencia cuando la formación presenta intervalos largos, intervalos mixtos de arena y lutita, e intervalos con altos contenidos de arcilla.
- No requiere arduos tratamientos químicos para ser eficaz.
- Es eficiente en pozos que ya tuvieron un tratamiento previo de control.
- No son afectados por la variación de la permeabilidad de formación.
- Generalmente menos costosos que los tratamientos químicos.

Desventajas

- No es común ni recomendable el uso de empaques con grava por sí solos, pues es importante contar con una etapa de retención adicional que permita además de ejercer control sobre la arena de formación, también sobre la grava del empaque, pues esta es también una arena no consolidada.

- Las mallas del gravel pack están expuestas a la erosión y corrosión por las altas velocidades de los fluidos producidos y fluidos corrosivos.
- Presenta mayor dificultad para aislar las zonas productoras de las zonas de gas y/o agua.
- Tiene una alta dependencia de la grava que conforma el empaque, porque si el tamaño es muy grande respecto al de la formación, la permeabilidad inicial será relativamente alta permitiendo el paso de algunas partículas que conlleven a taponamientos, por otro lado, si es muy pequeño la permeabilidad inicial será tan baja que los fluidos pueden no pasar con facilidad

Tabla 3.9 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de un empaque de grava (García y Preciado, 2020)

Técnica: Empaque de grava		Unidades	
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Formaciones no consolidadas que requieren altas tasas de flujo, con alto contenido de arcilla Intervalos largos y mixtos (arena y lutita)	N/A
	Tipo de completación		N/A
	Permeabilidad de la formación	Zonas de alta y baja permeabilidad	mD
	Tipo de pozo	Horizontales y verticales	N/A
	Rango de tamaño de grano (formación)	126 - 1000	µm
	Clasificación de rango de tamaño de grano de arena (Wentworth)	Fina - Gruesa	N/A
	Coefficiente de uniformidad de la formación (U)	< 5	Adimensional
	Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)	De uniforme a no uniforme	N/A

Según (Montesdeoca Lamar, 2008) las mallas premium han sido diseñadas para completaciones empleado solamente la malla o acompañado de otros métodos de

control, siendo usada en completaciones a hoyo abierto con y sin empaquetamiento de grava. Tiene una amplia gama de tamaño de poro y metalurgia que se ajustan a las condiciones de producción. A pesar de ser un método que ha demostrado una alta fiabilidad, durabilidad y eficiencia para el control de sólidos de formación, lo expuesto por (González Amado & Ramírez Ávila, 2016) indica que este método es muy poco usado dentro de la industria, de un total de 116 pozos tan solo un 4%, correspondiente a 5 pozos, fueron completados con este mecanismo. El poco uso de las mallas premium se puede deber a tres factores importantes, a los costos de su aplicación, a no ser tan conocida por ser una técnica una poco más reciente y, al igual que con los liners, existe una alta cantidad de variantes de malla para arena que pueden opacar esta solución. Sin embargo, este método se destaca por controlar un rango de partículas entre 60 a 500 micras, sirviendo como solución en parte para el problema de arenamiento y de retener una porción de los sólidos provenientes de una migración de finos.

Según lo expuesto por (González Amado & Ramírez Ávila, 2016) y (Montesdeoca Lamar, 2008), para la utilización de mallas premium se recomienda considerar lo siguiente:

Aplicación

- Han sido diseñadas para completaciones a hoyo abierto con y sin un empaquetamiento de grava
- Completaciones donde se requiere varios métodos de control de arena

Ventajas

- Tiene un mayor grado de retención de partículas de tamaño de grano pequeño
- Tiene una amplia gama de tamaño de poro y metalurgia que se ajustan a una variedad de condiciones de producción

Desventajas

- Se ha demostrado que usar el tamaño de la ranura igual al D10 conlleva a deficiencias en el puenteo ya sea por inestabilidad, colapso con cambios de tasa de flujo o no uniformidad en las arenas provocando una retención baja.

**Tabla 3.10 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de las mallas premium
(García y Preciado, 2020)**

Técnica: Malla Premium		Unidades	
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Formaciones con arenas poco consolidadas	N/A
	Tipo de completación	Completaciones a hoyo abierto con y sin un empaquetamiento de grava	N/A
	Permeabilidad de la formación		mD
	Tipo de pozo	Horizontales	N/A
	Tamaño de grano de la formación	60 - 500	µm
	Clasificación de rango de tamaño de grano de arena (Wentworth)	Limo grueso – Arena mediana	N/A
	Coefficiente de uniformidad de la formación (U)	<5	Adimensional
	Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)	De uniforme a no uniforme	N/A

El Frac Pack tiene como objetivo reducir las pérdidas de presión en las cercanías del pozo y con ello mejorar la trayectoria de flujo de fluidos al pozo. Una de las ventajas es que permite penetrar de una mejor manera en el área dañada del pozo. De las recomendaciones ya expuestas se han demostrado que no es aplicable cuando existe una cementación pobre, además de contacto agua-petróleo o gas-petróleo cercano (Montesdeoca Lamar, 2008). A pesar de que, según (Ocaña Proaño, 2012) este método puede ser variar entre buenos y malos resultados, por lo observado de su aplicabilidad en dos pozos diferentes, en donde se cree que lo poco favorable es debido a la dependencia de la eficiencia del empaquetamiento de grava y la invasión de la fractura en zonas no deseadas de la formación, el autor sostiene que el método tiene una gran preferencia al momento de necesitar un control de sólidos de formación por el hecho de que implica una estimulación. Además, este mecanismo se recomienda para un rango de partículas entre 50 a 200 micras, convirtiéndola en una solución eficiente en cierto grado para los sólidos implicados en la migración de finos.

En base a lo expuesto por (Montesdeoca Lamar, 2008) y (Ocaña Proaño, 2012), para la utilización del Frac Pack como mecanismo de control de sólidos de formación es necesario considerar lo siguiente:

Aplicación

- Consiste en un tratamiento de fractura pequeño combinado con un empaquetamiento de grava a hueco cerrado.
- Se recomienda este tipo de tratamiento en formaciones pobremente consolidadas con alta o baja permeabilidad y con un espesor relativamente grande.
- Se recomienda utilizarlo cuando se tiene una matriz de baja resistividad
- Es aplicable cuando existen arenas laminadas o sucesión de lutitas.

Ventajas

- Proporciona una trayectoria de flujo para las capas de arena que no están expuestas a las perforaciones, ya que reduce las pérdidas de presión en las cercanías del pozo.
- Se puede producir a ratas de producción más elevadas.
- Permite penetrar de una mejor manera en la zona dañada de la formación.
- Es una técnica que combina la estimulación y el control de sólidos de formación.
- Se evita el deterioro de la productividad, teniendo típicamente menor daño a la formación y creando un empaque externo para estabilizar los disparos que no están alineando con la fractura apuntalada.

Desventajas

- No es recomendable utilizarlo si se tiene un contacto agua-petróleo o gas petróleo muy cerca.
- No se debe emplear cuando existen limitaciones en la resistencia del casing.
- No es aplicable cuando existe una cementación pobre.
- Es posible que la productividad resultante sea inferior a la esperada debido a la combinación de diversos factores, incluyendo el daño por los disparos, la imposibilidad de lograr el arenamiento inducido en el extremo de la fractura, la cobertura incompleta de la fractura o del empaque del apuntalante, y las grandes

caídas de presión a través de los filtros de exclusión de arena y del equipo de terminación de pozos.

**Tabla 3.11 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de frac pack
(García y Preciado, 2020)**

Técnica: Frac Pack		Unidades	
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Arenisca poco consolidada y/o altamente susceptible al daño (Skin > 2)	N/A
	Tipo de completación	Fractura con empaquetamiento a huevo revestido	N/A
	Permeabilidad de la formación	< 50 y/o 100 - 1000	mD
	Tipo de pozo	Horizontal, vertical, simple y multilateral	N/A
	Tamaño de grano de la formación	50 – 200	µm
	Clasificación de los sedimentos según el tamaño de grano (Wentworth)	Limo grueso – Arena fina	N/A
	Coefficiente de uniformidad de la formación (U)	5 – 13	Adimensional
	Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)	Altamente no uniforme	N/A

Ningún método para el control de arena o para prevenir la migración finos funciona de la misma manera o es aplicable en todas las formaciones, cuando los métodos mecánicos no pueden ser usados, la consolidación química de arena es una opción muy factible, no tiene restricciones respecto a la distribución del tamaño de partículas en la formación, se puede realizar en un tiempo relativamente corto y no es muy costosa. Sin embargo son varias las consideraciones que se deben tomar para que su ejecución sea exitosa, de acuerdo con (Izurieta et al., 2020) y (Hassan et al., 2020) la temperatura de la formación es clave para determinar la factibilidad y el éxito del tratamiento, además junto con (Dachanu wattana et al., 2020) están de acuerdo en que después de un tratamiento químico existirá una reducción en la permeabilidad de la formación, por lo cual es algo a considerar al analizar candidatos para el tratamiento; otro factor en el que (Hassan et al., 2020) y (Dachanu wattana et al., 2020) están de acuerdo es en la importancia de las técnicas de colocación del fluido, por lo que

recomiendan el uso del bullheading o el coiled tubing, cada uno con sus propias ventajas y desventajas.

Aplicación

- Formaciones heterogéneas, ya que limitan la aplicación de métodos convencionales de control de arena (Izurieta et al., 2020).
- En yacimientos no consolidados se puede utilizar la consolidación de arena química preventiva para obtener tasas de producción más altas y un retorno más temprano de la inversión (Izurieta et al., 2020).
- Pozos en donde se ha observado taponamiento de pantallas (Dachanuwattana et al., 2020)

Ventajas

- Evita que la arena ingrese al pozo (Dachanuwattana et al., 2020).
- Mejora la resistencia a la compresión de la formación será para tolerar las fuerzas de arrastre de la producción de fluido del yacimiento, evitando así la producción de arena (Dachanuwattana et al., 2020).

Desventajas

- En la fase de diseño es crítico determinar la receta química y la técnica de colocación óptimas y seguras para la aplicación del método (Dachanuwattana et al., 2020).
- Produce una reducción de la permeabilidad en la formación donde es aplicada (Dachanuwattana et al., 2020).
- En formaciones con alto contenido de arcilla se tiene un bajo desempeño de consolidación (Dachanuwattana et al., 2020).

Tabla 3.12 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de una consolidación química de arena
(García y Preciado, 2020)

Técnica: Consolidación química de arena			Unidades
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Areniscas no consolidadas	N/A
	Permeabilidad de la formación	≥ 500 , para menores se recomiendan pruebas después del tratamiento	mD
	Tipo de pozo	Pozo entubado perforado	N/A
	Longitud del intervalo de perforación (ft)	20 – 40	ft
	Contenido de arcilla	10 %	N/A

Por otro lado, el método de aglomeración de arena, que aplica química que altera el potencial zeta (ZPAS), de acuerdo con (Hassan et al., 2020), (Mason et al., 2014) y (Singh et al., 2014), aumentará la atracción entre las partículas de arena pero su aplicación no inducirá ningún incremento significativo en la fuerza de compresión de la roca; además estos autores han observado que es necesario repetir este tratamiento para mantener su eficacia química, lo cual es un factor a considerar al aplicar a un pozo; de la misma manera están de acuerdo con lo útil que puede resultar este tratamiento en conjunto con otros métodos de control de arena mecánicos, y el proceso se puede utilizar para reparar pozos existentes o junto con la completación de nuevos pozos. Finalmente, tanto como los autores anteriores como (Mendez et al., 2011) indican que no hay una reducción significativa en la permeabilidad de la formación, además los pozos a los que se les aplicó este tratamiento redujeron significativamente su producción de finos.

Aplicación

- En pozos con producción de finos de formación, donde sea importante evitar la reducción de la permeabilidad que se produce con la consolidación química.

Ventajas

- Los productos químicos no llenan los poros de la garganta, por lo que no hay una pérdida significativa de permeabilidad (Dachanu wattana et al., 2020).

- Si el enlace iónico se rompe, se volverá a curar al contacto (Mason et al., 2014).
- Reduce o detiene significativamente la producción de finos (Mason et al., 2014).
- Se puede utilizar para mejorar los sistemas mecánicos de control de arena existentes, como paquetes de grava, standalone screens, frac-pack, etc (Singh et al., 2014).
- Hay poco o ningún límite práctico para el tamaño del intervalo de perforación que se puede tratar (Singh et al., 2014).

Desventajas

- No induce ningún incremento significativo en la resistencia a la compresión de la roca (Hassan et al., 2020).
- Necesita un tratamiento repetido después de cierto período de producción para mantener la eficacia química (Hassan et al., 2020).

Tabla 3.13 Parámetros recomendados para la aplicabilidad de la aglomeración de arena (García y Preciado, 2020)

Técnica: Aglomeración de arena		Unidades	
Información del pozo y formación productora	Tipo de formación	Areniscas no consolidadas	N/A
	Permeabilidad de la formación	No hay limitaciones	N/A
	Tipo de pozo	Cualquier tipo	N/A
	Longitud del intervalo de perforación (ft)	20 – 40	ft
	Contenido de arcilla	10 %	N/A

3.4. Resultados de la comparativa entre las condiciones del caso de estudio y las soluciones descritas

En base a lo revisado, si basamos la selección preliminar de un mecanismo según el rango de tamaño de grano y valores de coeficiente de uniformidad que se recomienda para la aplicabilidad de los distintos mecanismos, y lo contrastamos con la información granulométrica de la arena objetivo del caso de estudio, se plantea lo siguiente;

**Tabla 3.14 Comparativa de los parámetros recomendados para la aplicación de cada método mecánico
(García y Preciado, 2020)**

		Rango de tamaño de grano (formación)	Clasificación de rango de tamaño de grano de arena (Wentworth)	Coefficiente de uniformidad de la formación	Característica de la formación según el coeficiente de uniformidad (Penberthy y Shaughnessy)
Completación de pozos y métodos mecánicos	Liner Ranurado	62 - 1000	Arena muy fina – Arena muy gruesa	< 1.5	Uniforme
	Empaque de Grava	126 - 1000	Arena fina – Arena muy gruesa	< 5	Uniforme y no uniforme
	Mallas Premium	60 - 500	Limo grueso – Arena media	< 5	Uniforme y no uniforme
	Frac Pack	50 – 200	Limo grueso – Arena fina	5 – 13	Altamente no uniforme
Caso de estudio	Pozo 1H	211 - 501	Arena fina – Arena media	1.6	Uniforme
	Pozo 2H	284 - 970	Arena media – Arena gruesa	1.9	Uniforme
	Pozo 3H	430 - 1549	Arena media – Arena muy gruesa	1.7	Uniforme

En el caso del Pozo 1H se puede recomendar la aplicabilidad de tres mecanismos para control de sólidos de formación, como lo son el empaque de grava, la malla premium o el liner ranurado, debido a que el tamaño de las partículas de este pozo, correspondiente a sedimentos de arena fina y arena media, se encuentran dentro del rango recomendado para estos métodos. Además, según la información respecto al coeficiente de uniformidad, la arena objetivo de este pozo se caracteriza por ser uniforme, manteniendo la selección de los mecanismos ya mencionados, sin embargo, se realiza una excepción con el liner ranurado, debido a que, a pesar de que se trata de una formación uniforme el valor recomendado para el método es aproximado.

Para el caso del Pozo 2H lo recomendable sería la utilización de un empaque de grava, ya el tamaño de grano de la formación, correspondiente a sedimentos de arena

media y arena gruesa, y el coeficiente de uniformidad de la formación, que permite caracterizarla como uniforme, se encuentra dentro de los valores admitidos para la aplicabilidad del método. Nuevamente se podría realizar una excepción con el liner ranurado, debido a que, si cumple con el rango de tamaño de grano sugerido, sin embargo, se puede descartar debido a que el coeficiente de uniformidad ya se encuentra muy alejado de lo aceptable, quedaría a criterio propio admitir o no este mecanismo, ya que si es efectivo al poder retener las partículas susceptibles al movimiento del pozo. En cambio, tanto la malla premium como el frac pack son descartados debido a que el rango de tamaño de granos del caso de estudio esta fuera de lo recomendable para estos métodos, si se aplicara los sedimentos de arena gruesa tendrían libre movimiento.

Finalmente, para el caso del Pozo 3H se presenta una dificultad, debido a que ningún método estudiado, en cuanto al rango de tamaño de grano, es suficiente para controlar todas las partículas susceptibles al movimiento, específicamente los sedimentos correspondientes a arena muy gruesa, en caso de que no sean controladas, es altamente probable que produzcan el taponamiento de las ranuras por estas partículas que tiene mayor diámetro, pero si se obvia la presencia de estas partículas y se opta por utilizar un mecanismo que abarque la mayor retención de sedimentos, lo recomendable sería un empaque de grava o liner ranurado, de igual forma haciendo una excepción en este último, ya que se está trabajando en una formación uniforme, sin embargo, debido a que el valor del coeficiente de uniformidad se encuentra aproximado se podría descartar.

Entonces, para el Pozo 1H se podría aplicar un empaque de grava, liner ranurado o malla premium, para el Pozo 2H utilizar un empaque de grava, para el Pozo 3H se podría aplicar un empaque de grava o liner ranurado. Ahora si se tiene que profundizar en temas económicos, la malla premium se descartaría para el caso número uno, ya que, en contraste es el método que implica mayor inversión y por lo observado el menos eficiente con las condiciones del pozo. También es necesario tomar a consideración que actualmente el empaque de grava no se recomienda aplicarlo por sí solo, debido a su alta dependencia del resultado obtenido por la grava, por ende, para los tres pozos 1H, 2H y 3H, los más recomendable sería aplicar dos sistemas de control de sólidos de formación, siendo un empaque de grava combinado con liner ranurado, esto debido a que el empaque de grava ayudaría como soporte extra a la formación y evitando

derrumbamientos sobre el liner ranurado. Aun así, en el último pozo no se retendrían las partículas de arena muy gruesa debido a su tamaño, existiendo la posibilidad de que se trasladen provocando un taponamiento de los canales obtenidos por el puenteo, sin embargo, se esperaría que estas partículas tengan mayor estabilidad por el efecto de la grava permitiendo un puenteo exitoso y no exista una obstrucción.

Tabla 3.15 Parámetros recomendados para ejecutar métodos químicos de control de sólidos (García y Preciado, 2020)

		Temperatura de la formación (°F)	Permeabilidad de la formación (mD)	Tipo de completación	Longitud del intervalo de perforación (ft)	Contenido de arcilla
Métodos químicos en sitio	Consolidación química de la arena y aglomeración de arena	Dentro de la ventana de temperatura de operación de la resina*	≥ 500	Pozo entubado perforado	20 – 40	≤10%
Caso de estudio	Pozo 1H	190°F	2662	Pozo entubado perforado	90	≤5%
	Pozo 2H	190°F	2662	Pozo entubado perforado	633.10	≤5%
	Pozo 3H	190°F	2662	Pozo entubado perforado	416.90	≤5%

La temperatura del fondo del pozo acelerará o retrasará el proceso de curado dependiendo del rango de operación del químico inyectado*

De acuerdo con la tabla comparativa, los métodos químicos de control de arena sólo pueden ser aplicados al pozo 1H, porque se ajusta mejor a los parámetros antes descritos, a diferencia de los pozos 2H y 3H, en donde su intervalo de perforación es mucho mayor al rango recomendado para estos métodos. Por otro lado, aunque el intervalo de perforación del pozo 1H es de 90 ft, de acuerdo con la bibliografía consultada usando una técnica de colocación de cabeza de toro es factible la ejecución de un método químico. Finalmente, el método recomendado para el pozo 1H es una consolidación química de arena, dado que la permeabilidad es bastante buena y al no tener en cuenta esta restricción, el método propuesto es una excelente opción a largo plazo.

Capítulo IV

4. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se realizó una revisión detallada de las diferentes tecnologías que se pueden aplicar a nivel de subsuelo para manejar la producción de sólidos, en este apartado se resaltan los puntos que se consideran más importantes.

- Frente al estudio realizado, se puede concluir que entre los métodos mecánicos el liner ranurado, a pesar de tener sus inicios en la década de los treinta, sigue siendo el método mayormente utilizado en la actualidad debido a factores como su fácil instalación, costos y eficiencia, además de que en pozos con poco bolsillo esta opción es limitada porque puede existir un taponamiento en el fondo del pozo.
- Los métodos químicos tienen como principal objetivo evitar que la arena ingrese al pozo, sin embargo, presentan varios desafíos en su aplicación, entre ellos una pérdida de la permeabilidad o la repetición constante de la aplicación del método para su eficacia química, por ello el análisis de las condiciones de aplicación es muy importante.
- Al estudiar las diferentes metodologías que permiten la predicción de la producción de sólidos de la formación, se considera que un modelo híbrido entre el método MEM (metodología analítica) y los modelos numéricos es la mejor opción, ya que representaría mejor el comportamiento de la formación tanto actualmente como con la variación en el tiempo.
- A pesar de que el tamaño de grano y el coeficiente de uniformidad son dos variables granulométricas importantes para considerar en la selección preliminar de mecanismos mecánicos para el control de sólidos de formación, no es la única forma de hacerlo, debido a que se pueden considerar otras características como las tasas de producción del pozo, regímenes de flujo y siendo lo más importante los costos de aplicabilidad, por lo tanto una combinación de parámetros geológicos y petrofísicos es lo óptimo para una buena selección de un método de control de sólidos.

- Finalmente, en el caso de estudio analizado se concluyó que la aplicación de métodos mecánicos es la mejor opción para el control de sólidos de formación, dado que los métodos químicos presentan limitaciones de aplicación para los pozos 2H y 3H, y para el 1H su ejecución sería condicionada, es así que para los tres pozos 1H, 2H y 3H, los más recomendable sería aplicar dos sistemas de control de sólidos de formación, siendo el empaque de grava combinado con liner ranurado.

Recomendaciones

- Se recomienda la continuación de esta investigación en base a las nuevas tecnologías que se están desarrollando actualmente.
- Es recomendable, disponer de una gran cantidad de información que aporte otros parámetros útiles para la selección del método de control de sólidos de formación.
- Un análisis más detallado de los diferentes métodos numéricos con sus ventajas y desventajas sería óptimo para una mejor comprensión del riesgo de producción de arena en campos con poca información sobre las propiedades de las rocas.
- Se recomienda aplicar un análisis económico o de rentabilidad para cada mecanismo de control, con el objetivo de seleccionar un método que represente el mejor beneficio económico para la compañía operadora del campo.

BIBLIOGRAFÍA

(15 de Junio de 2018). Obtenido de Retai Group: <http://www.retaigroup.com/wp-content/uploads/2018/06/Slotted-liner.jpg>

Ahad, N. A., Jami, M., & Tyson, S. (2020). A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(4), 1675–1688. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00826-y>

AlAhmari, M., Bataweel, M., AlHumam, A., & AlMajed, A. (2020). Sand Consolidation by Enzyme Mediated Calcium Carbonate Precipitation. 1–14. <https://doi.org/10.2118/203192-ms>

Alakbari, F. S., Mohyaldinn, M. E., Muhsan, A. S., Hasan, N., & Ganat, T. (2020). Chemical sand consolidation: From polymers to nanoparticles. *Polymers*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM12051069>

Andrews, J., Ayuyn, J., Chanpura, R., Parlar, M., Mondal, S., & Sharma, M. (15 de Septiembre de 2015). Selección de filtro de arena. Obtenido de https://connect.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish15/sept15/2_san dscreen.pdf

Bedrikovetsky, P., Zeinijahromi, A., Siqueira, F. D., Furtado, C. A., & Souza, A. L. S. De. (2012). Suspension Transport in Porous Media. 173–197. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9839-1>

Carlson, J., Gurley, D., Price-smith, C., & Waters, F. (1992). Sanding Why and How.pdf. 41–53.

Corrales Tisalema, A. L. (Febrero de 2013). Aplicación de nuevas tecnologías para optimizar la producción en el campo Palanda - Yuca Sur. Obtenido de Repositorio Digital - Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/857>

Dachanuwattana, S., Prasongtham, P., Kulchanyavivat, S., Chigbo, I., Sreeroch, A., & Grassian, D. (2020). Chemical Sand Consolidation Design in Jasmine Field: Lessons Learned and Critical Success Factors from an Operator Point of View. <https://doi.org/10.2118/202877-ms>

De Pater, C., & Shaoul, J. (2019). Stimulation for geothermal wells in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 98, E11. doi:10.1017/njg.2019.8

Edment, B., Bakú, A., Elliott, F., & Gilchrist., J. (2005). Mejoramiento de los tratamientos de empaque de grava en pozos horizontales. Obtenido de http://www.oilproduction.net/files/p56_67.pdf

Fischer, C., Constien, V., & Vining, C. (2016). Gravel pack sizing criteria - It's time to re-evaluate. *SPE International Formation Damage Control Symposium Proceedings*, 2016-Janua, 24–26. <https://doi.org/10.2118/179023-ms>

Falconi Frías, R. A. (2010). Criterios de selección y control de arenas en la terminación de pozos inteligentes. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3913/1/tesis%20fin%20alv30.pdf>

García González, V. d. (octubre de 2003). Selección de un sistema adecuado de control de sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/2649/1/T.E.G%20Ver%C3%B3nica%20Garc%C3%ADa%20G..pdf>

González Amado, E. F., & Ramírez Ávila, J. D. (8 de Agosto de 2016). Diseño de una metodología de selección preliminar de sistemas de control de arena para los campos operados por Ecopetrol S.A en Colombia. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/489>

Grajales Herrera, S., & Hoyos Cifuentes, L. J. (2018). Metodología que permita estimar los factores críticos que puedan inducir la producción de arena por fuerzas de arrastre. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6671/1/5131551-2018-1-IP.pdf>

Habibi, A., Ahmadi, M., Pourafshary, P., & Ayatollahi, S. (2011). Reducing fines migration by use of Nanofluids injection-an experimental study. *JPT, Journal of Petroleum Technology*, 63(10), 106–110.

Hanafy, A. M., & Nasr-EI-Din, H. A. (2018). A new method to assess stimulation of sandstone cores damaged by fines migration. *SPE Western Regional Meeting Proceedings*, 2018-April. <https://doi.org/10.2118/190123-ms>

Hassan, N. A., Yeap, W. J., Singh, R., & Nik Khansani, N. Z. S. (2020). Performance Review of Chemical Sand Consolidation and Agglomeration for Maximum Potential as Downhole Sand Control: An Operator's Experience. <https://doi.org/10.2118/202419-ms>

Hibbeler, J., Garcia, T., & Chavez, N. (2003). An Integrated Long-Term Solution for Migratory Fines Damage. *Proceedings of the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, 152–162. <https://doi.org/10.2118/81017-ms>

Huang, T., Crews, J. B., & Willingham, J. R. (2008). Using Nanoparticle Technology to Control Fine Migration. September, 21–24. <https://doi.org/10.2118/115384-ms>

Hernández Espinosa, J. C., & Rojas Cuellar, N. (2016). Evaluación técnico-financiera de la inhibición de finos por aditivos químicos para cuatro pozos seleccionados en el campo Río Ceibas de la cuenca del valle superior del Magdalena. Obtenido de Repositorio de la Fundación Universidad de América: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/96/1/5112767-2016-2-IP.pdf>

Hernández Garcia, J. A. (2014). Evaluación de efectividad de inhibidores base amina - ppha en el lodo utilizado en campo Opón. Obtenido de <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/2020/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20LISTO.pdf>

Ibrahim, J. M. M., Piah, M. F. M., Panuganti, S. R., Salleh, I. K., & Hussein, A. M. O. (2020). On the development of an in-house fines stabilizer to control formation damage. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2020-May.

Izurietta, A., Serrano, F., Andrade, P., Burgos, A., Rodriguez, R., & Jaramillo, J. (2020). Chemical Sand Consolidation as an Effective Alternative to Conventional Sand Control Methods in Ecuador. 1–15. <https://doi.org/10.2118/203069-ms>

Jímenez Ruiz, R. G., & Paucar Catucuago, J. F. (Abril de 2011). Estudio del comportamiento del sistema de reinyección de agua del campo libertador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3739/1/CD-3536.pdf>

Liu, X., & Civan, F. (2007). Formation Damage by Fines Migration Including Effects of Filter Cake, Pore Compressibility, and Non-Darcy Flow - A Modeling Approach to Scaling From Core to Field. <https://doi.org/10.2523/28980-ms>

Limo. (s.f.). Obtenido de Rocas y minerales: <https://www.rocasym minerales.net/limo/>

Mason, D., Shamma, H., Van Petegem, R., Naguib, M., Mousa, H., Bentham, P., Ayt Khozhina, D., Singh, P., & Wan Razali, W. N. (2014). Advanced sand control chemistry to increase maximum sand free rate with improved placement technique - A case study. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1, 228–243. <https://doi.org/10.2118/170594-ms>

Matanovic, D., Cikes, M., & Moslavac, B. (2012). Sand Control in Well Construction and Operation. In Sand Control in Well Construction and Operation. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25614-1>

Mendez, A., Johnson, D., & Kakadjian, S. (2011). Use of zeta potential to maximize sand free rate: A new approach on sand control. Society of Petroleum Engineers - Brazil Offshore Conference 2011, 1(2007), 288–296. <https://doi.org/10.2118/143124-ms>

Montesdeoca Lamar, H. F. (Enero de 2008). Evaluación y control, actualizado de la producción de arena del campo Fanny-18B del bloque Tarapoa. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/761>

Muñoz, I. Á., & Torres Cely, M. L. (2018). Evaluación técnica de las propiedades mecánicas de un liner ranurado mediante pruebas estandarizadas para la industria petrolera. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6797/1/5132706-2018-2-IP.pdf>

Márquez Vera, M. (Noviembre de 2008). Clasificación de sedimentos clásticos mediante máquinas de vectores de soporte. Obtenido de http://bdigital.ula.ve/storage/pdfthesis/pregrado/tde_arquivos/8/TDE-2010-03-01T16:01:52Z-771/Publico/MarquezMelissa.pdf

Nguyen, P. D., Weaver, J. D., Rickman, R. D., Dusterhoft, R. G., & Parker, M. A. (2005). Controlling formation fines at their sources to maintain well productivity. IORC 05 - 2005 SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Proceedings, October 2006, 335–353. <https://doi.org/10.2523/97659-ms>

Noguera Montalva, C. A. (Agosto de 2011). Análisis de la productividad de un pozo de aceite a partir de pruebas de presión. Obtenido de Handle: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3616/Tesis.pdf?sequence=1>

Ogolo, N. A., Ezenworo, E. J., Ogri, E., Wali, S. M., Nnanna, E. C., & Onyekonwu, M. O. (2016). Study of fines mobilization by flow rate in the presence of Aluminium oxide nanoparticles. Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/184239-ms>

Ocaña Proaño, L. A. (Septiembre de 2012). Estudio de la aplicación de resinas fenólicas para controlar la producción de arena de la formación "M-1" en el campo Tarapao. Obtenido de http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5217/1/52923_1.pdf

Pazmiño Núñez, G. A. (Febrero de 2016). Evaluación de las técnicas de estimulación de yacimientos utilizados en un campo del oriente ecuatoriano.

PETROAMAZONAS, E. (Junio de 2017). Obtenido de <https://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/06/TTT-TAP.pdf>

Polo Padilla, J. E., & Figueroa Orejarena, J. W. (2013). Potencial de la tecnología de nanopartículas para controlar la migración de finos en el medio poroso. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/148538.pdf>

Quisnancela Ortiz, M. A. (Febrero de 2014). Análisis de los procedimientos de control de pozos en operaciones de reacondicionamiento realizadas en pozos petroleros del distrito amazónico. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7209/1/CD-5385.pdf>

Revelo Játiva, T. A. (Febrero de 2007). Actualización de reservas y ubicación de pozos de desarrollo en el campo Tapi - Tetete. Obtenido de Bibdigital - Escuela Politécnica Nacional: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/94>

Robledo Rodríguez, J. R. (Marzo de 2012). Análisis de barrenas y los fluidos de control aplicados a la optimización de la perforación de pozos. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/221>

Singh, P., Ludanova, N., & Van Petegem, R. (2014). Advancing chemical sand and fines control using zeta potential altering chemistry by using advanced fluid placement techniques. SPE - European Formation Damage Conference, Proceedings, EFDC, 1, 272–284. <https://doi.org/10.2118/168143-ms>

Soroush, M., Roostaei, M., Mohammadtabar, M., Hosseini, S. A., Mahmoudi, M., Sadzadeh, M., Ghalambor, A., & Fattahpour, V. (2020). Design for Reliability: Purpose Driven Sand Control Methods for Cased and Perforated Wells. <https://doi.org/10.2118/201315-ms>

Subbiah, S. K., Samsuri, A., & Teknologi, U. (2020). SPE-203238-MS Sanding Propensity Prediction Technology and Methodology Comparison Rock failure modes for sand production. Subbiah 2018.

Sanchez Bone, C. F. (9 de Mayo de 2014). Estudio Técnico-Económico para implementar sistemas de control de arena (Gravel Pack y Stand Alone) en pozos con alto ángulo de inclinación, campo Ginta, Bloque 16. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7373>

Servimeca Industrial S.A.S Colombia. (s.f.). Técnicas, herramientas e innovaciones para el control de arena en pozos de petróleo y gas. Obtenido de <https://servimecaindustrial.com/control-de-arena/>

Suquilanda Duque, N., & Vallejo Tixicuro, E. R. (Diciembre de 2015). Predicción de arenamiento mediante un modelo geomecánico para un campo del oriente ecuatoriano. Obtenido de Repositorio Digital - Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/5643>

Tronvoll, J., Eek, A., Larsen, I., & Sanfilippo, F. (2004). Oriented perforations as a sand-control method. JPT, Journal of Petroleum Technology, 56(10), 67–68. <https://doi.org/10.2118/1004-0067-jpt>

Tianjin Elegant Technology. (s.f.). Tuberías ranuradas API de alta precisión. Obtenido de <http://www.sovonex.com/es/equipo-de-perforacion/tuberias-ranuradas-api/>

Vallejo Tixicuro, E. R., & Suquilanda Duque, N. (Diciembre de 2015). Predicción de arenamiento mediante un modelo geomecánico para un campo del oriente ecuatoriano. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/5643>

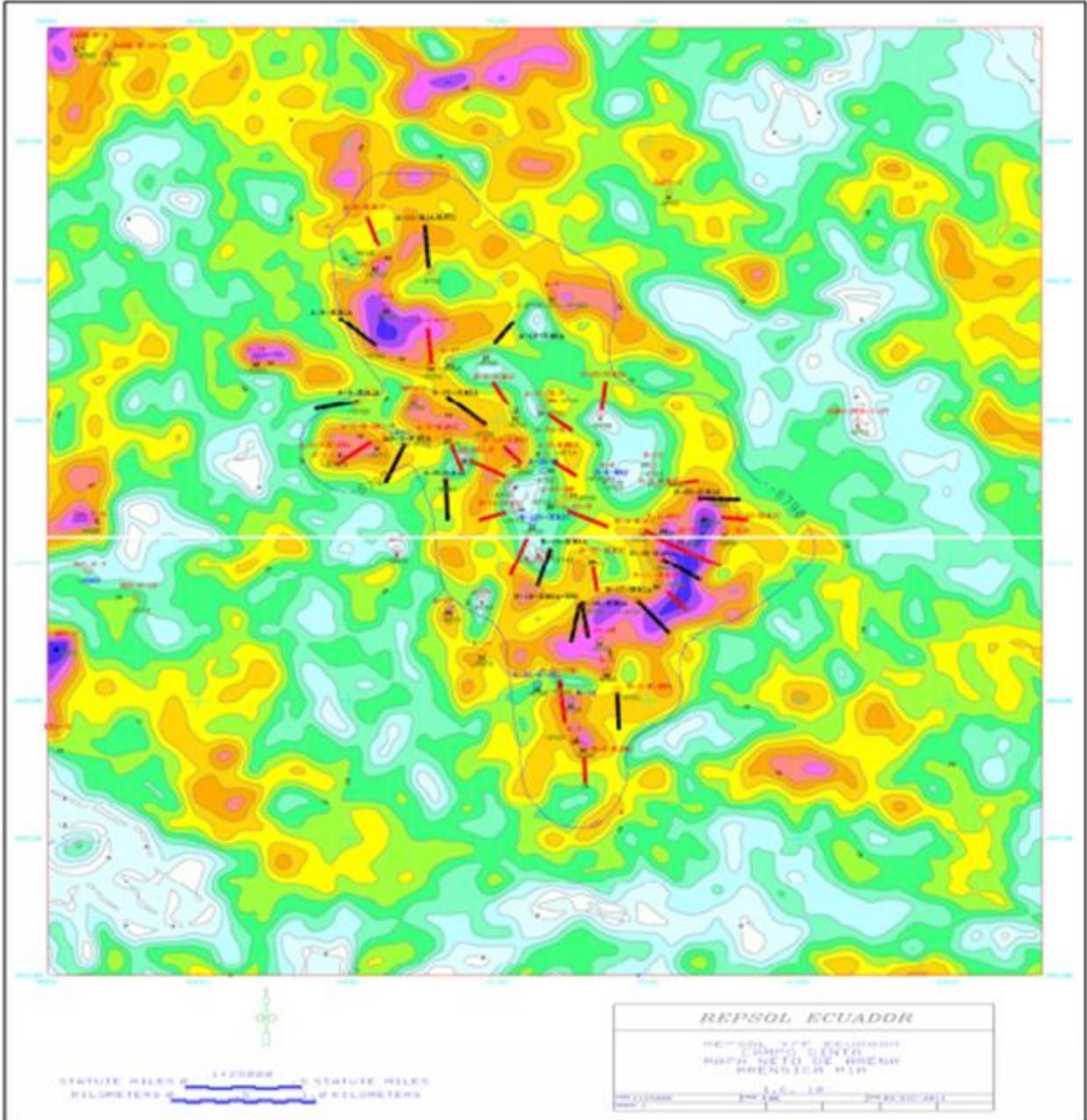
Veintimilla Vela, S. D. (Abril de 2018). Determinación de reservas mediante la actualización de los modelos estructural y petrofísico de la formación "U" Inferior del campo Tetete - Tapi. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/15533/1/T-UCE-0012-FIG-008.pdf>

Yáñez Caiza, D. M. (Febrero de 2018). Análisis de la migración de finos en los pozos de wellpad norte para determinar el tratamiento ideal y optimizar la producción del campo Palo Azul - Bloque 18. Obtenido de Repositorio Digital - Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14505>

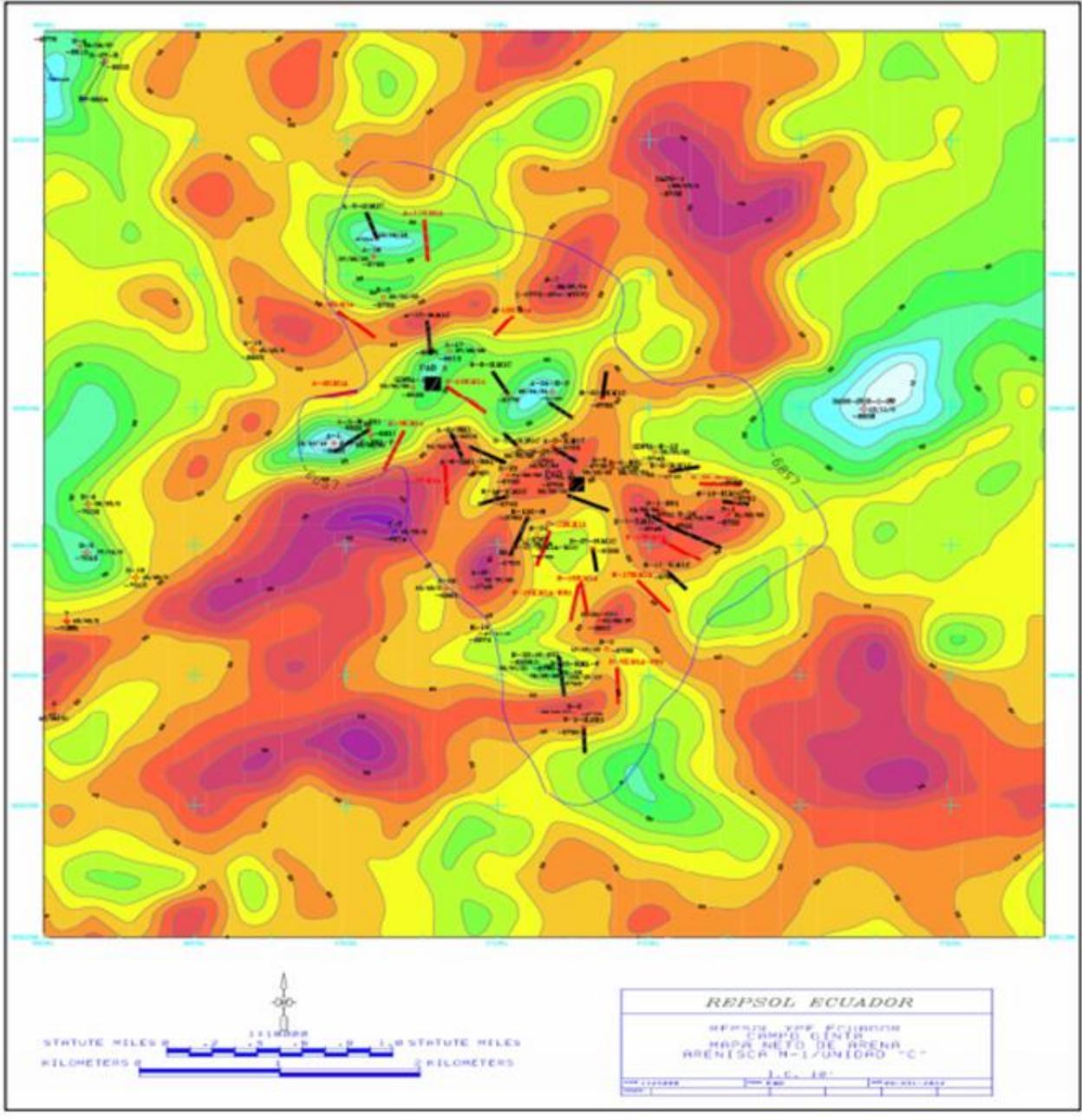
APÉNDICES

Anexo A

Mapa neto de arena, arenisca M1A, Bloque 16



Mapa neto de arena, arenisca M1C, Bloque 16



Hoja de cálculo de análisis por tamizaje Pozo 1H

**Calculate
D Values**

Sieve Analysis Form

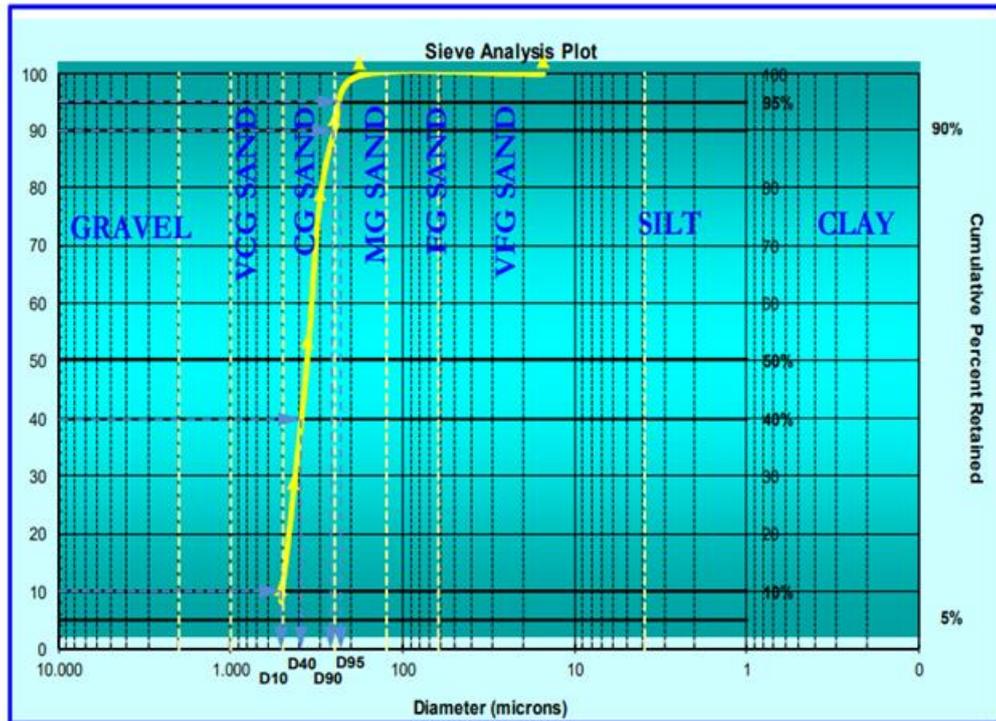


Baker Oil Tools

Date: Julio 30, 2013	D5 (in. & micron):	0	0 μm
Analyst: Carlos Sánchez	D10 (in. & micron):	0.0197127	501 μm
Sample No.: 1	D40 (in. & micron):	0.0153722	390 μm
Company: Repsol Ecuador	D50 (in. & micron):	0.0141389	359 μm
Field: Ginta	D90 (in. & micron):	0.0097300	247 μm
Well No.: Pozo X	D95 (in. & micron):	0.0083173	211 μm
Depth:	UC(D40/D90) / SC(D10/D95):	1.6	2.4
	D50 x 6 (in. & mesh):	0.0848	10 mesh
Comments:	Gravel Size(Saucler's Criteria):	8-12	
	Screen Options:	S A S	G P Screen
	Criteria:	UC<3, SC<10, d10>150μm Dictated by Gravel	
	Bakerweld:	20ga Bakerweld	30ga Bakerweld
	Excluder:	ExcluderCoarse	ExcluderCoarse
	Expandable (criteria / Rec):	d10, >300 μm	ExpressCoarse

Sieve Size	Sieve (in.)	Sieve (μm)	Empty Wt.	Final Wt.	Sand Wt.	Cumulative Wt.	Cumulative %
35	0.0200	508		7.30	7.30	7.30	8.22
40	0.0170	432		16.50	16.50	23.80	26.80
45	0.0140	356		21.60	21.60	45.40	51.13
50	0.0120	305		22.80	22.80	68.20	76.80
60	0.0098	249		11.50	11.50	79.70	89.75
80	0.0070	178		8.80	8.80	88.50	99.66
PAN	0.0006	15		0.30	0.30	88.80	100.00

Análisis de tamizaje del Pozo 1H



Hoja de cálculo de análisis por tamizaje Pozo 2H

Calculate D Values

Sieve Analysis Form

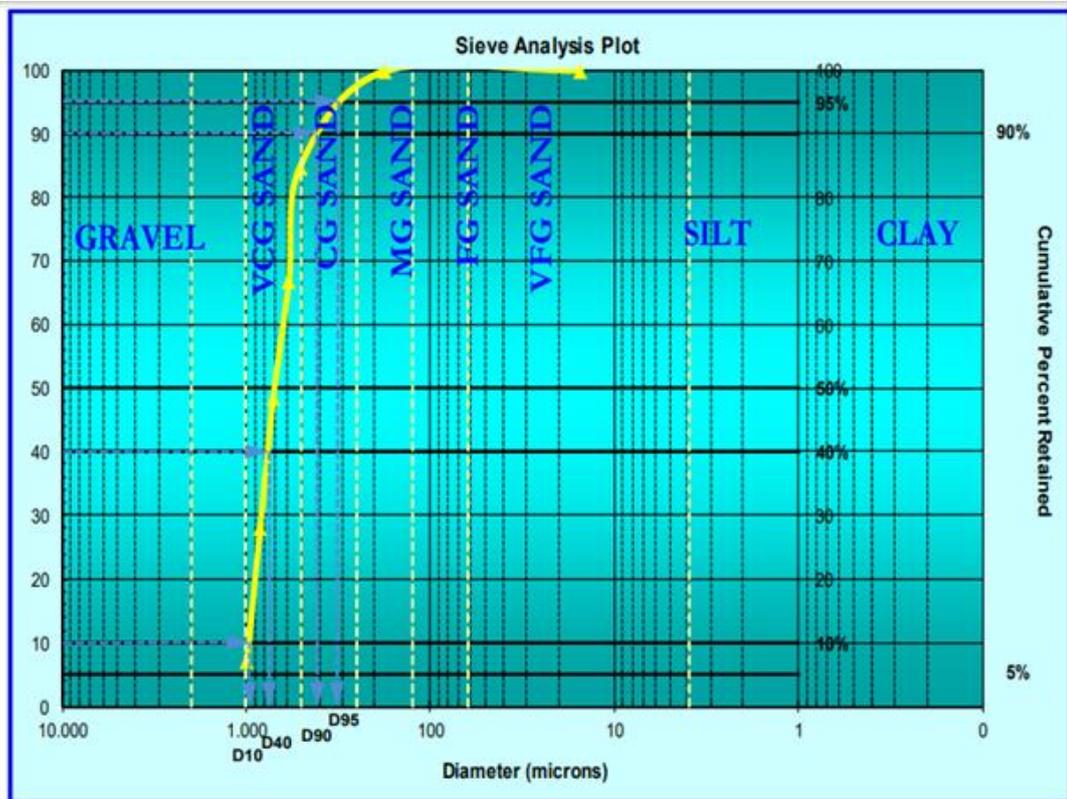


Baker Oil Tools

Date: Julio 30, 2013	D5 (in. & micron):	0	0 μm
Analyst: Carlos Sánchez	D10 (in. & micron):	0.0381966	970 μm
Sample No.: 2	D40 (in. & micron):	0.0300855	764 μm
Company: Repsol Ecuador	D50 (in. & micron):	0.0276154	701 μm
Field: Ginta	D90 (in. & micron):	0.0155341	395 μm
Well No.: Pozo X	D95 (in. & micron):	0.0111906	284 μm
Depth: 9140 - 9144	UC(D40/D90) / SC(D10/D95):	1.9	3.4
	D50 x 6 (in. & mesh):	0.1657	5 mesh
	Gravel Size(Saucier's Criteria):	8-12	
Comments:	Screen Options:	S A S	G P Screen
	Criteria:	UC<3, SC<10, d10>150 μm	Dictated by Gravel
	Bakerweld:	30ga Bakerweld	30ga Bakerweld
	Excluder:	ExcluderCoarse	ExcluderCoarse
	Expandable (criteria / Rec):	d10, >300 μm	ExpressCoarse

Sieve Size	Sieve (in.)	Sieve (μm)	Empty Wt.	Final Wt.	Sand Wt.	Cumulative Wt.	Cumulative %
18	0.0390	991		4.10	4.10	4.10	7.22
20	0.0330	838		11.80	11.80	15.90	27.99
25	0.0280	711		11.70	11.70	27.60	48.59
30	0.0230	584		10.40	10.40	38.00	66.90
35	0.0200	508		10.20	10.20	48.20	84.86
80	0.0070	178		8.50	8.50	56.70	99.82
PAN	0.0006	15		0.10	0.10	56.80	100.00

Análisis de tamizaje del Pozo 2H



Hoja de cálculo de análisis por tamizaje Pozo 3H

Calculate D Values

Sieve Analysis Form



Baker Oil Tools

Date: Julio 30, 2013	D5 (in. & micron):	0	0 μm
Analyst: Carlos Sánchez	D10 (in. & micron):	0.0609951	1549 μm
Sample No.: 3	D40 (in. & micron):	0.0297528	756 μm
Company: Repsol Ecuador	D50 (in. & micron):	0.0266040	676 μm
Field: Ginta	D90 (in. & micron):	0.0178268	453 μm
Well No.: POZO X	D95 (in. & micron):	0.0169345	430 μm
Depth: 9182 - 9188	UC(D40/D90) / SC(D10/D95):	1.7	3.6
	D50 x 6 (in. & mesh):	0.1596	5 mesh
Comments:	Gravel Size(Saucler's Criteria):	8-12	
	Screen Options:	S A S	G P Screen
	Criteria:	UC<3, SC<10, d10>150μm	Dictated by Gravel
	Bakerweld:	30ga Bakerweld	30ga Bakerweld
	Excluder:	ExcluderCoarse	ExcluderCoarse
	Expandable (criteria / Rec):	d10, >300 μm	ExpressCoarse

Sieve Size	Sieve (in.)	Sieve (μm)	Empty Wt.	Final Wt.	Sand Wt.	Cumulative Wt.	Cumulative %
12	0.0660	1676		3.80	3.80	3.80	8.33
18	0.0390	991		4.10	4.10	7.90	17.32
25	0.0280	711		12.30	12.30	20.20	44.30
35	0.0200	508		14.90	14.90	35.10	76.97
40	0.0170	432		8.20	8.20	43.30	94.96
60	0.0098	249		2.20	2.20	45.50	99.78
PAN	0.0006	15		0.10	0.10	45.60	100.00

Análisis de tamizaje del Pozo 3H

