

**METODOLOGIA PARA LA EVALUACION CUANTITATIVA DE VOLUMENES DE
PRODUCCION DE ARENA**

JUAN SEBASTIAN LATORRE GAMARRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2012

**METODOLOGIA PARA LA EVALUACION CUANTITATIVA DE VOLUMENES DE
PRODUCCION DE ARENA**

JUAN SEBASTIAN LATORRE GAMARRA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

M. Sc. JORGE ANDRES SACHICA AVILA

Ingeniero de Petróleos

Co-Director

M. Sc. YAIR ANDRES QUINTERO PEÑA

Ingeniero de Petróleos ICP

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2012

Dedicatoria

Este libro es resultado de muchas razones:

Mi madre y mi padre...

...quienes todo por mí lo han dado

Mis hermanos...

...quienes siempre a mi lado han estado

Mis familiares...

...quienes me han apoyado.

AGRADECIMIENTOS

La colaboración recibida por parte de algunos miembros del ICP-ECOPETROL por la relevancia de la información suministrada y su posterior asesoría la atribuyo a la ingeniera Diana Martin y al ingeniero Yair Andrés Quintero.

En la academia la oportunidad de poner en práctica lo aprendido en la Escuela de Ingeniería de Petróleos y adquirir nuevos conocimientos mediante la realización de este libro fue concedida por la ingeniera Olga Patricia Ortiz, el ingeniero Fernando Calvete y el ingeniero Jorge Andrés Sáchica.

El apoyo incondicional por parte de familiares como mi tía Edith y esposo, a Eduardo Rincón, su esposa y mis primos Samara y Jesús. Mis colegas y buenos amigos Oscar, Javier, Daniel, Fabián y Andrés.

CONTENIDO

INTRODUCCION	124
1. GENERALIDADES DEL ARENAMIENTO.....	16
1.1 PROBLEMAS GENERADOS POR EL ARENAMIENTO	16
1.2 METODOS DE CONTROL DE ARENA.....	17
1.3 CONTROL DE ARENA SIN CEDAZOS.....	20
1.4 TÉCNICAS MECÁNICAS (CEDAZOS-EMPAQUETAMIENTOS).....	21
1.5 CAUSAS DE LA PRODUCCION DE ARENA	23
1.5.1 Caída de Presión:.....	24
1.5.2 Distribución de esfuerzos	24
1.5.3 Características de la roca.....	25
1.5.4 Corte de agua	25
1.5.5 Tasa de producción.....	25
2. GENERALIDADES DE LOS POZOS A EVALUAR	27
2.1 DESCRIPCION.....	27
2.2 POZO CANDIDATO L- 61	27
2.3 POZO CANDIDATO L-62	30
3. SELECCIÓN DE VARIABLES Y DESARROLLO DEL MODELO PREDICTIVO	
34	
3.1 DESARROLLO DE LA PREDICCION MEDIANTE EL DISEÑO	
EXPERIMENTAL.....	35
3.2 DESARROLLO DE LA PREDICCION MEDIANTE UN MODELO	
ANALITICO.....	37
3.2.1 Modelo cualitativo analítico	37
3.2.2 Diagramas de araña modelo cualitativo	40

3.2.3	Modelo cuantitativo analítico	43
4.	PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGIA	44
5.	DESARROLLO DE LA METODOLOGIA APLICADA A POZOS POR EVALUAR	46
5.1	SELECCIÓN DEL POZO A EVALUAR.....	46
5.2	ESQUEMA DE PRODUCCIÓN	46
5.3	MODELAMIENTO EXPERIMENTAL	46
5.4	MODELAMIENTO ANALÍTICO CUALITATIVO	48
5.4.1	L-61	49
5.4.2	L-62.....	50
5.5	CORRECCIÓN POR EVENTOS	51
5.5.1	L-61	52
5.5.2	L-62.....	53
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	56
	CONCLUSIONES	62
	BIBLIOGRAFIA.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pendiente de las variables usadas en el modelo.....	41
Tabla 2. Propiedades variables del modelo predictivo.....	42
Tabla 3. Arena modelada mediante el método seleccionado en el diseño experimental..	47
Tabla 4. Registro de producción de arena L-61.....	52
Tabla 5. Registro de producción de arena L-62.....	54
Tabla 6. Diferencia promedio entre la arena medida y modelada en el pozo L-61.	58
Tabla 7. Diferencia promedio entre la arena medida y modelada en el pozo L-62.	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Taponamiento de las líneas de producción por acumulación de granos de arena.....	17
Figura 2 :Diagrama de un proceso convencional de gerenciamiento de arenas. ..	18
Figura 3 :Terminación de pozos sin cedazos.....	21
Figura 4. Cedazos dañados por la erosión.. ..	23
Figura 5. Fuerzas hidrodinámicas actuando sobre un grano de arena.	26
Figura 6. Diagrama diagnóstico del pozo L-61.....	28
Figura 7. Historial de producción L-61.	29
Figura 8. Producción acumulada de L-61.	29
Figura 9. Caída de presión histórica de L-61.	30
Figura 10. Diagrama diagnóstico del pozo L-62.....	31
Figura 11. Historial de producción L-62.	32
Figura 12. Producción acumulada de L-62.	32
Figura 13. Caída de presión histórica de L-62.	33
Figura 14. Factores de diseño que generan el problema del arenamiento:	35
Figura 15. Parámetros involucrados en el modelo cualitativo analítico.....	39
Figura 16. Diagrama de arañas para el modelo predictivo.	40
Figura 17. Variación de los factores no constantes del modelo.	42
Figura 18. Gráfica de producción de arena modelada mediante el diseño experimental seleccionado.	48
Figura 19. Arena producida en L-61 según eventos.	49
Figura 20. Arena predicha en L-61 según modelo.....	50

Figura 21. Arena producida en L-62 según eventos.	50
Figura 22. Arena predicha en L-62 según modelo cualitativo.	51
Figura 23. Arena producida en L-61 según modelo cualitativo-correcto.	53
Figura 24. Arena producida en L-62 según modelo cualitativo-correcto.	55
Figura 25. Volúmenes de arena producida y modelada mediante el diseño experimental y el método analítico para L-61.	56
Figura 26. Volúmenes de arena producidos y modelados mediante el método analítico para L-62.	57
Figura 27. Porcentaje de error entre arena medida por eventos y modelo experimental junto con modelo analítico para L-61.	59
Figura 28. Porcentaje de error entre arena medida por eventos y modelo experimental junto con modelo analítico para L-62.	60

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN DE ARENA *

AUTOR: JUAN SEBASTIAN LATORRE GAMARRA **

PALABRAS CLAVE: Arenamiento, gerenciamiento de arenas, modelo de producción, producción de arena.

El gerenciamiento de la producción de arena implica múltiples actividades que pretenden controlar los volúmenes de arena que el pozo va a producir, ya sea, en el fondo del pozo, en superficie o evitando el fenómeno bajo cierto esquema de producción. Para llevar a cabo este análisis se identifican las variables culpables de generar el desprendimiento de los granos de arena y su posterior migración en un intento por controlar el flujo de estos, si no es viable, se procede a producir la arena y/o excluirse.

La etapa más importante para gerenciar la producción de arena es la predicción de volúmenes a producir, ya que a partir de la cantidad de arena predicha se podrán tomar decisiones en cuanto a su control. La literatura muestra que los factores más importantes para modelar volúmenes de arena son: caída de presión, corte de agua, porosidad, tasa de producción de fluidos, viscosidad del fluido, presión de poro, esfuerzos de la roca y grado de consolidación de la roca. Algunas de estas variables son controlables y otras como las propiedades de la roca y el fluido no lo son.

Los dos modelos presentan un comportamiento fiel respecto a los volúmenes medidos, y aunque el modelo desarrollado por el método experimental tiene un margen de error casi constante, no es aplicable en casos donde existen pocos registros de producción de arena; el modelo analítico corregido con el evento registrado de producción de arena, se mantiene generalmente en un menor margen de error y es aplicable a todos los pozos usados en el montaje experimental ya que necesita de un solo registro de producción de arena.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Jorge Andrés Sachica Ávila. Codirector Yair Andrés Quintero Peña.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF SAND PRODUCTION VOLUMES *

AUTHOR: JUAN SEBASTIAN LATORRE GAMARRA **

KEYWORDS: sand, sand management, production model, sand production.

Sand production management carries many activities which try to have control in the sand volumes that the oil wellbore produces, this control can be in the bottom or on the surface of the wellbore, or can prevent this phenomenon by using production plan. To make the appropriate analysis, the factors responsible for the sand grain detachment and subsequent migration are identified by being controlled, if this effect is not visible, the sand can be produced and excluded.

The most important stage in the sand management is the sand volume prediction, because knowing the quantity of sand that the wellbore will produce, is possible to take tight correct decision. The literature explains the most important factors to include in the sand prediction model: draw down, water production, porosity, fluids production rate, fluid viscosity, reservoir pressure, rock strength sand rock consolidation status. Some of these factors are controllable but other factors like rocks and fluids properties are not.

Experimental design generates a predictive model which results are similar to the measured sand volume because this development is based on the existing measures. Analytical model shown in this project lets to predict sand volumes which will be produced by choosing an adequate production plan for the wellbore, formation and fluids characteristics and also measured sand production quantity.

Both models very faithfully show the performance about the sand measures; although the experimental one has a constant error margin, is not applicable in cases where doesn't exist many production logs; the analytical corrected model with the registered sand production, in general has a minor error margin and is useful in all wellbores because it needs only documentation of sand production.

* Degree Work

** Faculty of Chemistry Engineering - Mechanical. Petroleum Engineering School. Director. Jorge Andrés Sachica Ávila . Codirector Yair Andrés Quintero Peña.

INTRODUCCION

Es frecuente encontrar en gran variedad de campos dedicados a la explotación de hidrocarburos problemas relacionados con la producción de arena de forma paralela a la producción del fluido de interés, este fenómeno es más común en formaciones poco consolidadas (aunque no exclusivo de ellas) y depende de factores propios tanto de las operaciones de producción como de las características del yacimiento de las cuales se haría necesario mencionar la caída de presión, los caudales de fluidos producidos, el estado mecánico de la roca, el grado de consolidación de la arena y el tiempo que ha producido el pozo. Todos estos fenómenos reunidos generan una serie de fuerzas de arrastre que actúan localmente sobre cada grano de arena, generando su desprendimiento de la roca junto a su posterior transporte y asentamiento.

Este fenómeno no es deseado en los pozos productores (generalmente no se desea la presencia de este fenómeno en la producción de hidrocarburos a excepción de los campos que usan un esquema de desarrollo por CHOPS, el cual es una nueva técnica de producción de arena en forma simultánea con el aceite y cuyo principio básico es aumentar la producción de dicha arena) debido a los múltiples inconvenientes que genera durante la vida productiva de estos se verá afectada por problemas como daños por abrasión en los equipos, taponamiento y disminución del diámetro efectivo de la tubería, actividades de limpieza que acarrearán tiempo no productivo además de la disminución en la producción del hidrocarburo; estos inconvenientes obviamente se ven reflejados en mayores costos de operación, lo que representa un mayor gasto de dinero el cual puede comprometer seriamente la viabilidad financiera de un proyecto.

La producción no deseada de arena es un problema que necesita de un constante monitoreo, el cual a su vez solicita de recurso humano y financiero para su control

efectivo, este hecho implica que bajo la manipulación de los factores que tienen efecto sobre el arenamiento es posible mitigar el problema generado por éste fenómeno, abriendo así, la posibilidad de predecir el comportamiento en cuanto a arenas se refiere en un pozo bajo cierto esquema de producción.

Plantear una serie de actividades y operaciones matemáticas para predecir el comportamiento además de la cantidad de arena que potencialmente producirá un pozo determinado es la idea central del presente trabajo, permitiendo así, generar una metodología que identifique el esquema de producción más eficaz en cuanto a control de arena y productividad del pozo.

1. GENERALIDADES DEL ARENAMIENTO

El arenamiento es un fenómeno en el cual se presenta una notoria cantidad de sólidos provenientes de la formación productora durante el proceso de extracción del hidrocarburo, este hecho es resultado del grado de consolidación de la roca y el efecto de las fuerzas de arrastre ejercidas por el fluido en movimiento sobre los granos que se encuentran en la formación productora, las cuales sobrepasan la resistencia mecánica de dicha roca.

A lo largo de la vida productiva del pozo, este fenómeno puede acarrear múltiples problemas que pueden llegar a representar altos costos en operaciones de mantenimiento y que son consecuencia del esquema de producción al que se encuentre sometido el pozo.

1.1 PROBLEMAS GENERADOS POR EL ARENAMIENTO

La industria considera la producción de arena como un problema cuando la tasa de producción de ésta es alta ya que genera:

- Abrasión en la tubería y equipos del sistema de fluidos.
- Taponamiento del pozo por migración y posterior acumulación de la arena.
- Implementación de sistemas de control de arenas.



Figura 1: Taponamiento de las líneas de producción por acumulación de granos de arena. Tomado de: <http://pennycompendium.com/2011/06/26/china-us-counting-on-albertas-huge-oil-sand-reserves/>

1.2 METODOS DE CONTROL DE ARENA

El control de arenas en pozos de gas y aceite es necesario para obtener una tasa razonable en la producción a lo largo de un extenso periodo de tiempo. En la industria de los hidrocarburos hay disponibles diversos métodos para controlar este fenómeno los cuales son aplicados siguiendo criterios de que método es el mejor en cada caso relacionando costo con beneficios, en general en control de arenas se puede catalogar en (“SAND CONTROL TROUGHT LINEAR FRAC PACK (LGFP) TECHNIQUE: CASE HISTORIES (CUENCA DEL CASANARE, COLOMBIA)”); Orozco D., Ramírez J., Perenco; Cadena R., Rodríguez L., Halliburton; ACIPET, 2007):

- Métodos mecánicos
- Métodos químicos
- Métodos combinados (mecánico-químico)

El debate sobre cuál es el método más efectivo para el control de arenas ha sido muy intenso durante muchos años según las estrategias tomadas por las

compañías (“Intelligent Sand Management”; Oyeneyin Bobs, Macleoid Chris, Oluyeme Gbenga, Robert Gordon University, Onuku Anthony, Vetco-Gran Limited; SPE, 2005). Convencionalmente el proceso para el gerenciamiento de arenas consiste en:

- Una evaluación de riesgo y una predicción en la producción de éstas.
- Seleccionar una forma de ataque para el control de arena según sea activo o pasivo el fenómeno y dadas las opciones de tratamiento en superficie o fondo de pozo.
- Monitoreo de los granos en el fondo del pozo y del volumen producido.

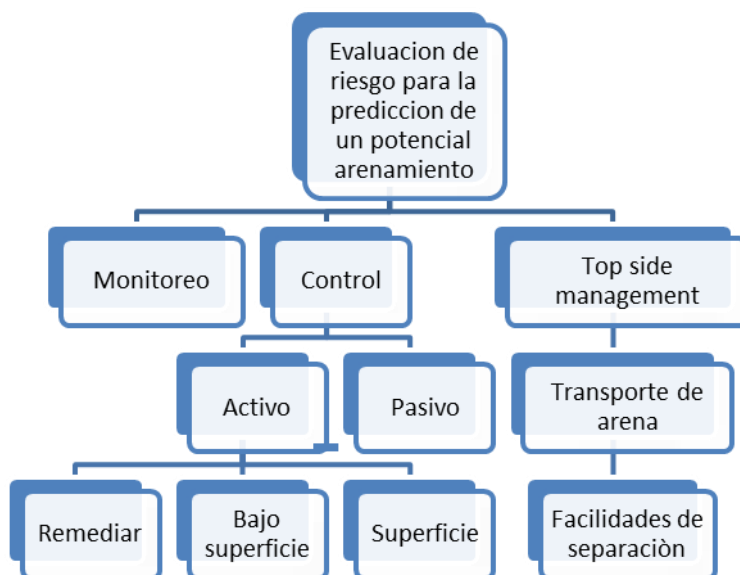


Figura 2 :Diagrama de un proceso convencional de gerenciamiento de arenas. **Modificado de:**“INTELLIGENT SAND MANAGEMENT”; Oyeneyin Bobs, Macleoid Chris, Oluyeme Gbenga, Robert Gordon University, Onuku Anthony, Vetco-Gran Limited; SPE, 2005.

Según Mathis el gerenciamiento de arenas puede ser categorizado y sub-categorizado de la siguiente manera por etapas:

PREDICCIÓN

- Modelo teórico de fallas en arenas.
- Técnicas para determinar las propiedades de la roca.
- Evaluación de parámetros que afectan los esfuerzos de la formación durante la vida productiva del yacimiento.

PREVENCIÓN

- Determinar la máxima tasa de arena libre.
- Cálculo de la máxima caída de presión.
- Co-producción de aceite y arena para maximizar la productividad.
- Estabilización de la formación.
- Técnicas de exclusión de arena y técnicas de instalación.

PRODUCCIÓN

- Monitoreo de arena
- Facilidades de superficie.
- Remediación.
- Técnicas de eliminación.

Según los resultados del modelo predictivo generado durante la primera etapa será seleccionado el mejor esquema de control de arena ya sea exclusión, producción o control. Para estos esquemas de trabajo se encuentran las siguientes técnicas aplicadas en la industria los cuales en su mayoría representan altos costos a nivel operacional.

1.3 CONTROL DE ARENA SIN CEDAZOS

Un punto de gran importancia para mantener un flujo limpio de arena se da en los métodos de terminación del pozo mediante la aplicación de alguna (s) de las siguientes tecnologías ayudando a controlar la producción de arena (“Métodos de control de la producción de arena sin cedazos”; Acock Andrew, Heitmann Norbert, Hoover Steve, Zia Malik Badar, Pitoni Enzo, Riddles Claud, Solares Ricardo; Oilfield Review; 2003); estos métodos aplicados de forma correcta permiten completar el pozo sin necesidad de aplicar cedazos o filtros lo que traduce en reducción de costos:

- Fase, orientación y tamaño óptimo de disparos.
- Fracturas hidráulicas anchas con el control del crecimiento longitudinal de la fractura a través de todos los disparos.
- Control de contra flujo del apuntalante.
- Consolidación química o estabilización de la formación.
- Cementación de intervalos permeables indeseados, previamente empacados.

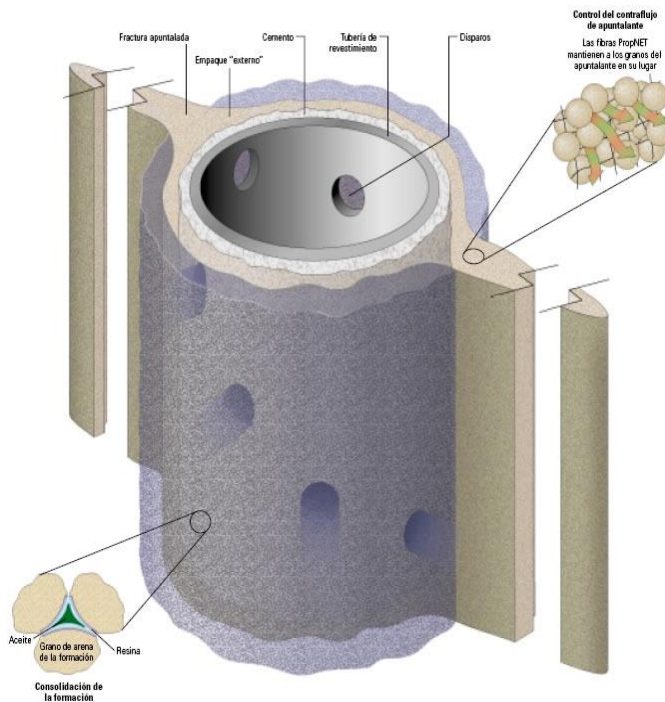


Figura 3 : Terminación de pozos sin cedazos: esta técnica combina operaciones de disparos optimizados con la consolidación química de la formación y el fracturamiento hidráulico con el crecimiento longitudinal de la fractura. (*"MÉTODOS DE CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA SIN CEDAZOS"*; Acock Andrew, Heitmann Norbert, Hoover Steve, Zia Malik Badar, Pitoni Enzo, Riddles Claud, Solares Ricardo; *Oilfield Review*; 2003, página 41.

La ventaja de no implementar cedazos reside en el hecho de no restringir el tamaño del pozo en los intervalos productivos, aunque un procedimiento de este tipo aplicado incorrectamente disminuye las posibilidades de éxito considerablemente.

Las técnicas de terminación de pozos sin cedazos son usadas como alternativa para remediar o rehabilitar cedazos erosionados o taponados sin usar equipos de reparación de pozos para extraer tuberías o cedazos.

1.4 TÉCNICAS MECÁNICAS (CEDAZOS-EMPAQUETAMIENTOS)

Algunos métodos para controlar la producción de arena se basan en principios mecánicos, algunos de ellos son el empaquetamiento con grava, tratamientos de fracturamiento con empaque, empaques de grava en agujeros descubiertos y los

cedazos (“Recuperación del control de la producción de arena”; Armentor Ricky and Wise Michael, Chevron USA Inc.; Bowman Mike, Nueva Orleans, Luisiana; Cavazzoli Gustavo, Rio de Janeiro, Brasil; Collin Gildas, and Rodet Vincent, Perenco; Holicek Bob, Houston , Texas; King George, BP; Lockyear Chris, BP; Parlar Mehmet, Rosharon Texas; Oilfield Review, Otoño de 2007). El principio básico de este método es filtrar la arena ya sea mediante mallas o cedazos, mediante la presencia de empaques o cortinas de gravas o mediante el uso combinado de los dos procedimientos mencionados.

➤ *Empaquetamiento con grava*

El proceso de empaquetamiento con grava consiste en instalar cortina de gravas que permite el flujo en la cara del pozo junto con la presencia de una malla que detiene la arena transportada. La zona comprendida por la grava generara permeabilidad y una zona apta para detener los granos de arena provenientes de la formación mientras que la malla tendrá como objetivo filtrar los granos que traspasan la zona de grava por medio de “tamices” cilíndricos ubicados en la boca del pozo los cuales tienen diámetros múltiples y/o están de forma concéntrica al tubing según el diseño el cual está limitado por la necesidad del cliente y los servicios ofrecidos por el fabricante.

➤ *Rejillas*

El control de arena por rejillas tiene un costo periódico al darse la necesidad de cambio a los cedazos debido al deterioro generado por el alto efecto abrasivo de la arena sobre estos como se puede observar en la figura 4. Se hace necesaria una constante supervisión.

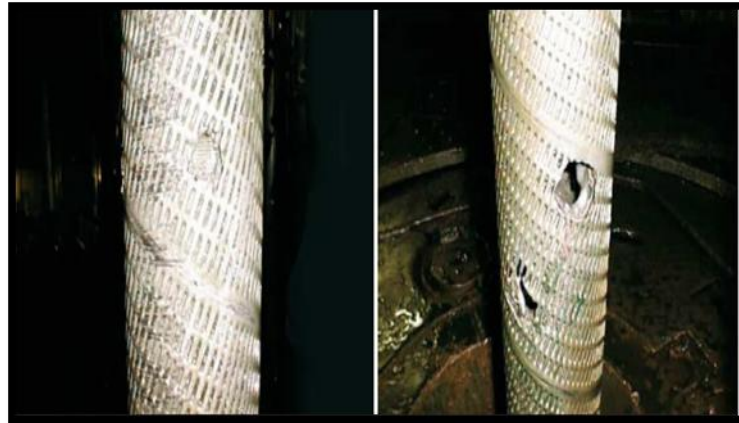


Figura 4. Cedazos dañados por la erosión. (“RECUPERACIÓN DEL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA”; Armentor Ricky and Wise Michael, Chevron USA Inc.; Bowman Mike, Nueva Orleans, Luisiana; Cavazzoli Gustavo, Rio de Janeiro, Brasil; Collin Gildas, and Rodet Vincent, Perenco; Holicek Bob, Houston , Texas; King George, BP; Lockyear Chris, BP; Parlar Mehmet, Rosharon Texas; Oilfield Review, Otoño de 2007).

1.5 CAUSAS DE LA PRODUCCION DE ARENA

Para algunos autores la producción de arena puede abarcar desde unos cuantos granos por metro cubico a cientos de kilos después de varios años de producción, este fenómeno va de la mano con el hecho que al remover la arena, un cambio en el tamaño y forma de las cavidades productoras se generara (“PETROLEUM RELATED ROCK MECHANICS”, 2 Edition, E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes, Elsevier, 2008). Según observaciones en algunos casos de estudio, la producción de arena tiene una fuerte relación a las caídas de presión y al inicio de producción de agua, Wang reafirma esto al plasmar que la producción de sólidos es el resultado de la disgregación mecánica del esqueleto de la matriz junto con la perdida de cohesión, dilatación y aplaste, combinado con las fuerzas viscosas de arrastre que desalojan las partículas y las transportan a cavidades, túneles de perforación o cualquier otra cavidad hecha por el fluido; esto se traduce en que todo parámetro que modifique las propiedades del fluido además de las propiedades del yacimiento, tendrán un efecto directo en el fenómeno de producción de sólidos.

1.5.1 Caída de Presión: Durante la producción de un campo, la caída de presión de poro ocasiona una acumulación de esfuerzos alrededor del pozo lo que puede ocasionar que la roca falle. La caída de presión está ligada a algunas propiedades geomecánicas de la roca.

1.5.2 Distribución de esfuerzos: Los esfuerzos son conocidos como la fuerza que se le aplica a un cuerpo por unidad de área (“ROCK MECHANICS PRINCIPLES AND ENGINEERING APPLICATIONS”, S.A.B. DAFONTOURA, 1980), estos esfuerzo son de vital importancia ya que al perforar un pozo, los esfuerzos son redistribuidos en la cara de este y pueden generar inestabilidad en la zona cercana a la cara del pozo.

En la mecánica de rocas los esfuerzos son siempre compresivos debido a la carga que debe soportar la roca, cabe anotar que sus unidades son iguales a las de presión [psi, KPa, N/m²,...] (“FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA”, Álvarez M., Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Geología, UIS, 2004) y se representan con el signo σ :

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

1.5.3 Características de la roca: Es necesaria la caracterización de la roca ya que sus propiedades van a determinar algunas características del flujo de fluidos dentro de este medio. Cabe resaltar que el grado de cementación de la roca juega un papel muy importante en cuanto a la cantidad de arena que se va a producir ya que si es pobre en cemento, los granos que componen la roca van a estar más expuestos a las fuerzas de arrastre generadas por los fluidos. Otras características de la roca de trascendental impacto son la porosidad y la permeabilidad ya que el fluido podrá estar en mayor o menor cantidad al igual que tendrá mayor o menor movilidad según los valores de estos dos parámetros.

1.5.4 Corte de agua: El comienzo de la producción de agua está ampliamente ligado a serios problemas de producción de arena ya que el hecho de estar produciendo altos cortes de agua indica que la zona invadida por este líquido dentro del yacimiento es mayor, lo que se traduce en una mayor disgregación de los granos que conforman la roca al contener el cemento que soporta los granos mencionados, gran cantidad de arcillas las cuales reaccionaran de forma desfavorable con el agua.

$$C_w = \frac{Q_w}{Q_L} = \frac{q_w}{q_o + q_w}$$

1.5.5 Tasa de producción: La tasa de producción a la que va a ser producida el pozo, juega un papel muy importante tanto a la hora de determinar la caída de presión, como en el efecto que puedan tener las fuerzas hidrodinámicas sobre los granos de la roca. Fjaer plantea una ecuación de las fuerzas que actúan sobre la roca como efecto de los fluidos que atraviesan el medio poroso para calcular el efecto de estas sobre un grano de arena.

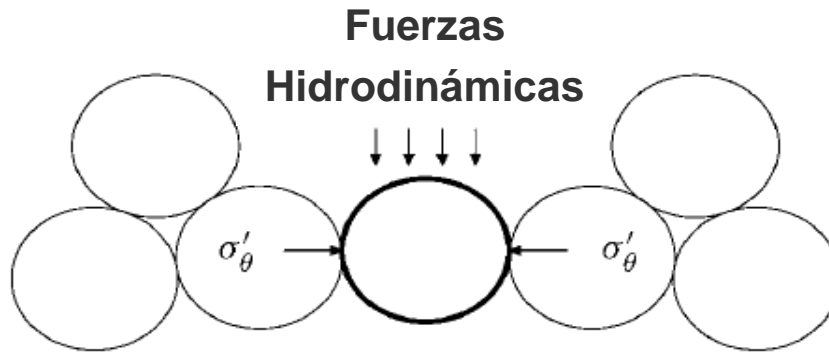


Figura 5. Fuerzas hidrodinámicas actuando sobre un grano de arena. Son el equivalente a la fuerza que deben tener los fluidos para remover un grano de arena. Tomado de: Fjaer et all

De la Ley de Darcy y usando la ecuación de Koseny-Karman, Fjaer obtiene una expresión para la fuerza que actúa sobre un solo grano por efecto de las fuerzas hidrodinámicas:

$$F = \left(\frac{n_f}{k}\right) Q \Delta x$$

$$K = \frac{1}{180} \left(\frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \right) d_g^2$$

Darcy	
n_f	Viscosidad dinámica del fluido
K	Permeabilidad
Q	Caudal
Δx	Longitud del volumen
F	Fuerza sobre el volumen

Koseny-Carman	
Φ	Porosidad
d_g	Diámetro del grano
N	Número de granos en el volumen seleccionado
Volumen de sólido= $(1-\Phi)A\Delta x$	
Volumen de 1 grano= $(1/6)\pi(d_g)^2$	

$$F = \frac{F}{N} = 30\pi n_f \left(\frac{(1-\Phi)^2}{\Phi^3} \right) \frac{Q}{A} d_g^2$$

Ecuación Fuerza Hidrodinámica actuando sobre un grano de arena. Tomado de :“PETROLEUM RELATED ROCK MECHANICS”, 2 Edition, E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes, Elsevier, 2008.

Se puede apreciar que estas fuerzas están en función del caudal y aunque estén calculadas para un grano de arena, Fjaer plantea más en detalle el desarrollo de esta ecuación en su libro Petroleum Related Rock Mechanics para un volumen de arena.

2. GENERALIDADES DE LOS POZOS A EVALUAR

2.1 DESCRIPCION

El campo seleccionado ha presentado múltiples problemas de arenamiento en el transcurso de su vida productiva; en algunos pozos un tanto antiguos, los problemas se presentan hace décadas, mientras que en otros pozos que han sido perforados en los últimos años el fenómeno de predicción de arena se registra como un evento más reciente.

Los pozos se designaron como Latorre-61 y Latorre-62 y en el desarrollo del libro se usa la abreviatura L-61 y L-62 por facilidad en la redacción y organización tanto de graficas como del mismo texto.

2.2 POZO CANDIDATO L- 61

Este pozo se encuentra en producción desde finales de la década de los 70 y en el transcurso de su vida productiva se han realizado múltiples actividades de mantenimiento, entre las cuales se encuentran: cañoneos, cambios de bombas y limpiezas debido a los efectos que ha tenido el efecto del arenamiento sobre el mismo.

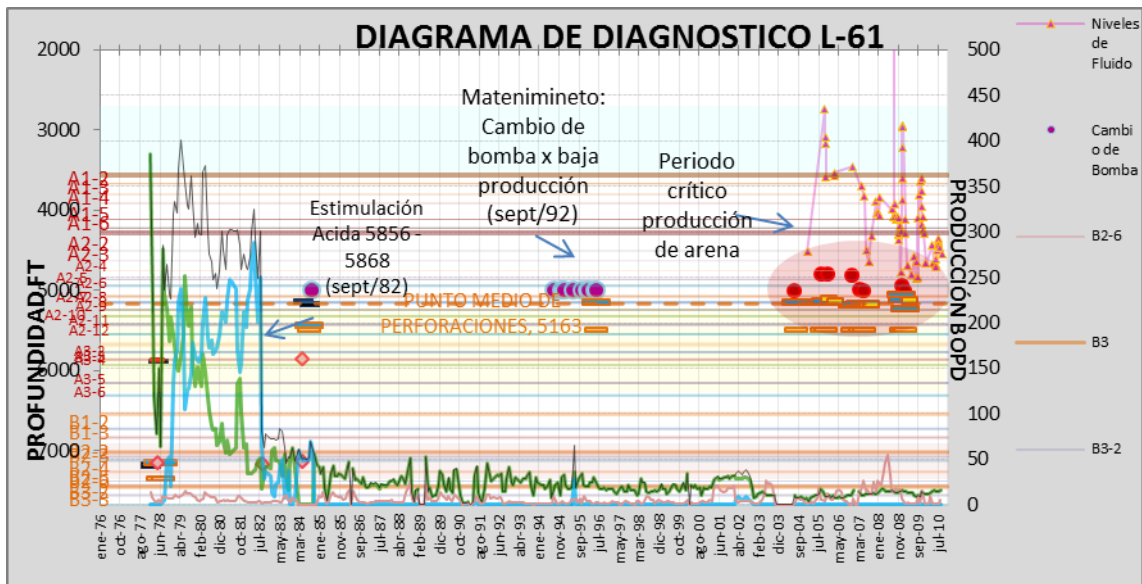


Figura 6. Diagrama diagnóstico del pozo L-61. Fuente: ECOPETROL S.A.

Por los eventos registrados que son consecuencia directa o están relacionados con la producción de arenas, es posible hacer candidato a L-61 como pozo a evaluar en la búsqueda de generar la predicción de volúmenes de arena por la calidad de información existente.

La información de yacimientos suministrada por ECOPETROL S.A. no es expuesta en este libro pero es importante resaltar que las características petrofísicas y de yacimientos más relevantes y usadas para desarrollar esta metodología son: permeabilidad (k), presión de burbuja (P_b), factor volumétrico del aceite (B_o), relación gas-aceite (GOR), viscosidad (μ), temperatura (T), gravedad API, además del espesor de la formación productora.

La historia de producción y la caída de presión de L-61 han sufrido drásticos cambios a lo largo de la historia del pozo, cabe resaltar que la producción de agua es un factor muy importante en cuanto al fenómeno de arenamiento por su efecto en el cemento que sostiene los granos de la roca:

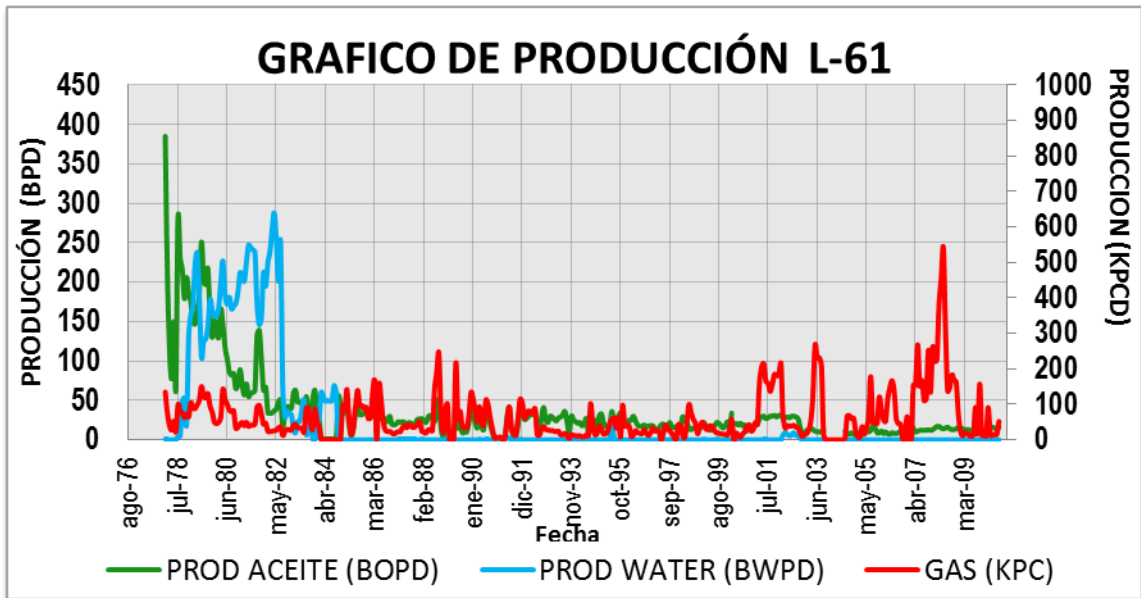


Figura 7. Historial de producción L-61. El pozo L-61 produce aceite, agua y gas además de arena. Fuente: ECOPETROL S.A.

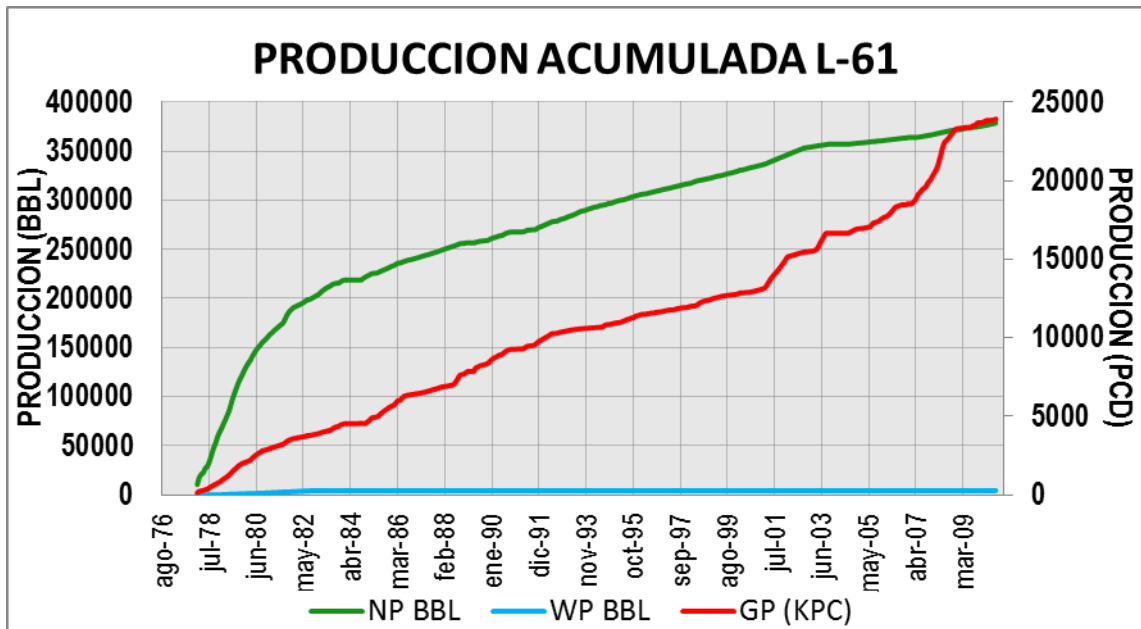


Figura 8. Producción acumulada de L-61. Volumen acumulado de fluidos producidos por el pozo L-61. Fuente: ECOPETROL S.A.

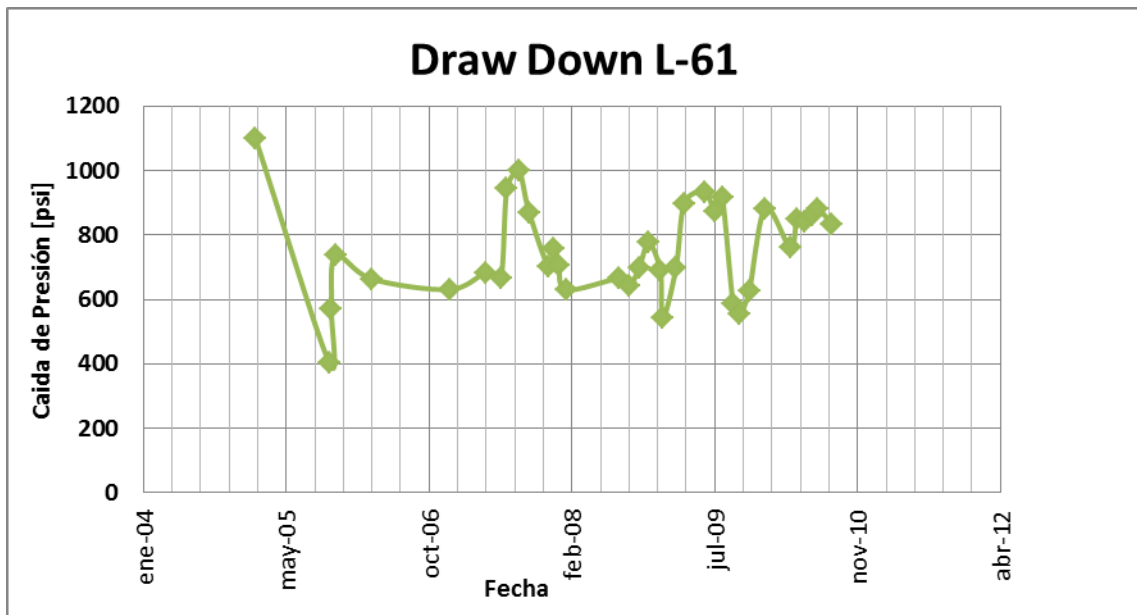


Figura 9. Caída de presión histórica de L-61. Comportamiento de la caída de presión del pozo L-61. Fuente: ECOPEL S.A.

2.3 POZO CANDIDATO L-62

Otro pozo del que se encuentra suficiente información además de presentar problemas de arenamiento es L-62 el cual comenzó operaciones en el año hace unos pocos años y en tan corto periodo de tiempo ha necesitado múltiples intervenciones como cambio de bomba arenada, limpiezas por arenamiento, mediciones de fondo y cañoneos por el fenómeno nombrado.

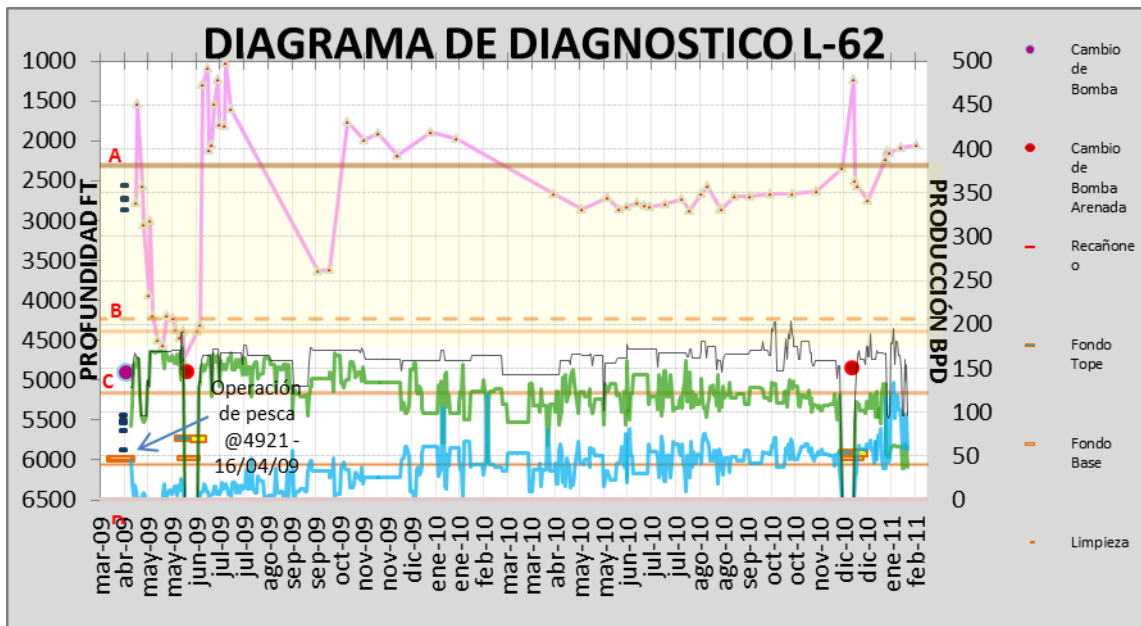


Figura 10. Diagrama diagnóstico del pozo L-62. Fuente: ECOPETROL S.A.

Un hecho a favor de este pozo es, es el hecho de ser un pozo relativamente nuevo ya que desde el comienzo de sus operaciones se ha llevado un registro detallado de sus características a diferencia de L-61 del cual ha producido por varias décadas y tan solo en la última se ha monitoreado con bastante detalle.

Las características de L-62 usadas fueron las mismas usadas respecto a petrofísica y yacimientos, pero con los valores que caracterizaron al pozo Latorre 62 los cuales no serán expuestos en este documento. La historia de producción le L-62 es la siguiente:

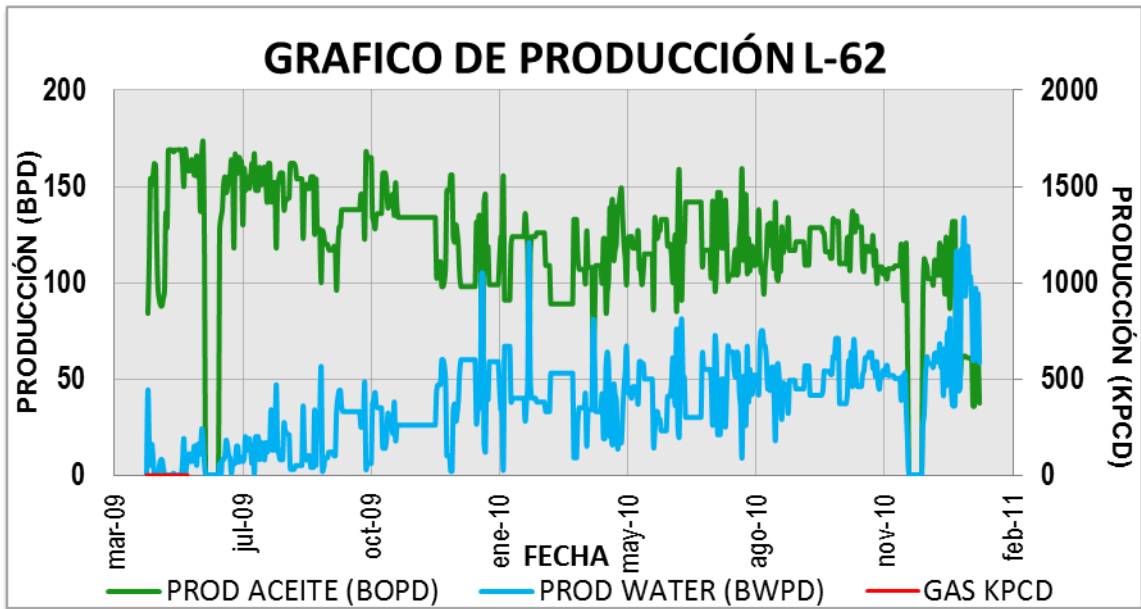


Figura 11. Historial de producción L-62. El pozo L-62 produce aceite y agua además de sedimentos. Fuente: ECOPETROL S.A.

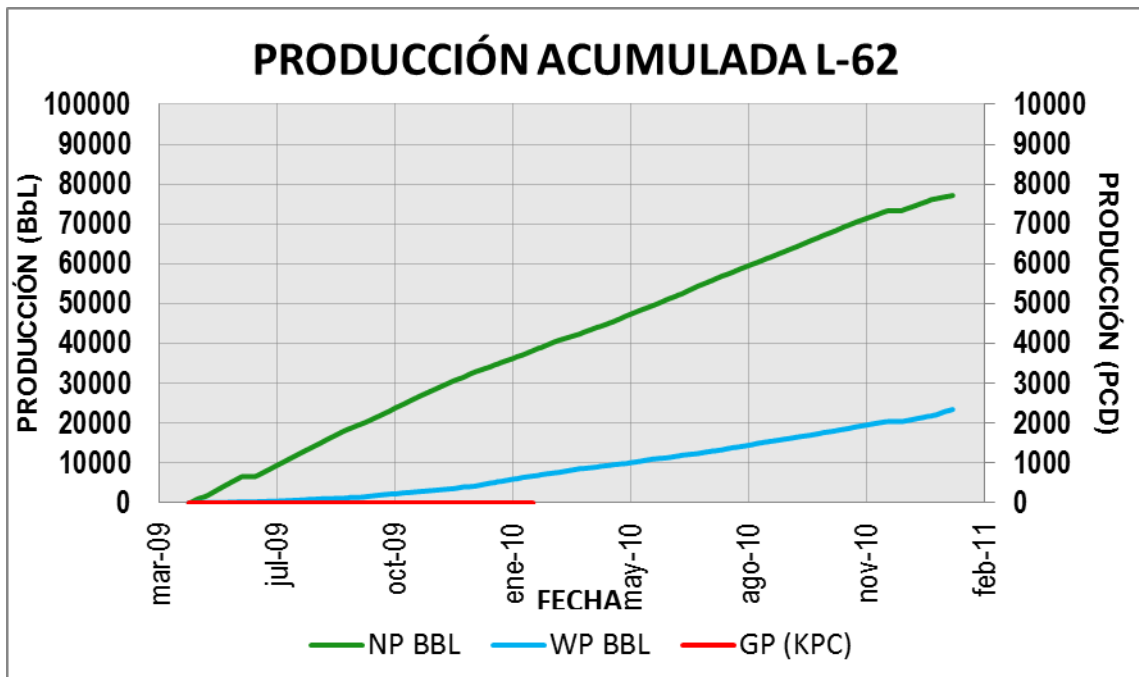


Figura 12. Producción acumulada de L-62. Volumen acumulado de fluidos producidos por el pozo L-62. Fuente: ECOPETROL S.A.

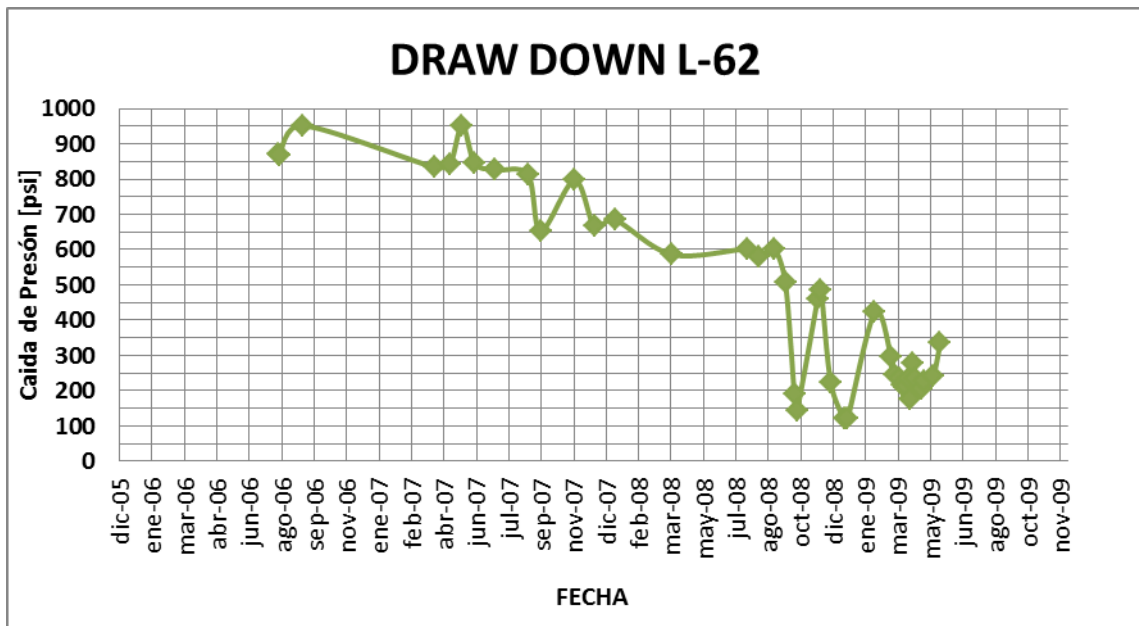


Figura 13. Caída de presión histórica de L-62. Caída de presión histórica del pozo L-62. Fuente: ECOPETROL S.A

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de datos históricos de estos dos pozos comprenden una cantidad suficiente de información como para tener una buena base de comparación con respecto a la metodología desarrollada.

3. SELECCIÓN DE VARIABLES Y DESARROLLO DEL MODELO PREDICTIVO

Para predecir la cantidad de arena que puede producir un pozo es necesario generar una función que abarque los parámetros (o la mayoría de estos) identificados como responsables o con efecto alguno en el fenómeno del arenamiento, según la literatura algunos de estos factores son:

- Caída de presión
- Corte de agua
- Permeabilidad
- Porosidad del medio
- Tasa de producción de los fluidos
- Viscosidad del fluido
- Presión de Poro
- Esfuerzos de la roca
- Deformación y grado de consolidación de la roca
- Fallamiento de la roca (UCS Uniaxial Compressibility Strenght)



Figura 14. Factores de diseño que generan el problema del arenamiento: **Recopilación de los factores involucrados en el fenómeno del arenamiento encontrados en la literatura.** Fuente: Autor.

3.1 DESARROLLO DE LA PREDICCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO EXPERIMENTAL

El uso del diseño de experimentos planteado por Montgomery es un recurso útil para generar un modelo predictivo experimental sobre el potencial de un pozo para producir arena a partir del registro de volúmenes ya producidos de la misma.

Para este estudio se dispone de una sola variable dependiente (arena producida) y de múltiples variables independientes (q_o , q_w , ΔP , t), la relación que existe entre estas variables se puede reducir a un modelo matemático llamado modelo de regresión, el cual se basa en la muestra de datos tomados.

Montgomery plantea que estos métodos de regresión son usados para analizar datos de experimentos no planeados como observaciones de fenómenos no controlados o registros históricos (situación que se adapta a este caso). El modelo de regresión permite encontrar una ecuación de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_k son las variables predictorias o regresores, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los parámetros desconocidos, de los cuales β_0 define la intersección del plano con el eje de coordenadas y ε es el término usado para el error.

El método de mínimos cuadrados es usado frecuentemente al estimar los coeficientes de regresión lineal múltiple, procedimiento para el cuál, se deben contar con $n > k$ observaciones, en general se necesitan $p = k + 1$ número de observaciones, equivalentes al número de ecuaciones.

La notación matricial y su desarrollo, permite estimar los coeficientes de la regresión y $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, de la siguiente manera:

$$y = x\beta + \varepsilon$$

Dónde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

En general, Y es un vector ($nx1$), X es una matriz ($n \times p$) de los niveles de las variables, β es un vector ($px1$) de los coeficientes de regresión y ε es un vector ($nx1$) de los errores aleatorios. La estimación de mínimos cuadrados se realiza con la expresión:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$$

Mediante el procedimiento matricial que comprende calcular la matriz inversa $(X'X)^{-1}$, luego desarrollar el vector $X'Y$ y posteriormente operar estos entre sí.

Actualmente en el mercado se encuentran múltiples software que hacen este procedimiento algo muy sencillo.

3.2 DESARROLLO DE LA PREDICCIÓN MEDIANTE UN MODELO ANALÍTICO

La base del modelo analítico es la ecuación de análisis de presiones en la cual están relacionados la mayoría de los parámetros mencionados en la literatura, por lo tanto se muestra a continuación el proceso de generación de un modelo predictivo de arena a partir de una ecuación usada en análisis de presiones la cual se basa, a su vez, en la ecuación de difusividad; la ecuación de difusividad no será desarrollada aquí ya que es posible remitirse a ella mediante las referencias bibliográficas, se procederá a partir de la solución general descrita en el libro de Lee.

3.2.1 Modelo cualitativo analítico: Desarrollar una función a partir de un modelo predictivo ya existente fue la opción más apropiada para generar una ecuación que reuniera la mayoría de factores antes nombrados y que representara de forma realista las características de los pozos; tomando como eje el procedimiento de análisis de presiones para calcular la caída de presión a partir de las características del yacimiento y las tasas de producción del pozo a evaluar, se invierte la dinámica de su objetivo para que en lugar de calcular la caída de presión, obtenga un resultado con la cantidad de sedimentos (y/o) arena que se produce en el yacimiento a partir de la caída de presión esperada.

$$\Delta P = -70,6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right]$$

Dónde:

q_o =caudal de aceite en [bb/día]

q_w =caudal de agua en [bb/día]

q_B =caudal de sedimentos en [bb/día]

B = Factor volumétrico de formación

μ = viscosidad [cp]

K = Permeabilidad [mD]

h = espesor de la formación [ft]

ϕ = porosidad

C_t = Compresibilidad de la formación [psi^{-1}]

r = radio del pozo [ft]

t = tiempo [horas]

Como $q=q_o+q_w+q_B$

$$\Delta P = -70,6(q_o + q_w + q_B) \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right]$$

Dividiendo ambos términos sobre q_w , se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{q_w} = -70,6 \frac{(q_o + q_w + q_B) B\mu}{q_w kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right]$$
$$\frac{\Delta P}{q_w} = -70,6 \left[\left(\frac{q_o + q_w}{q_w} \right) + \frac{q_B}{q_w} \right] \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right]$$

Sabiendo que el corte de agua es:

$$C_w = \frac{Q_w}{Q_L} = \frac{q_w}{q_o + q_w}$$

$$\frac{\Delta P}{q_w} = -70,6 \left[\left(\frac{1}{C_w} \right) + \frac{q_B}{q_w} \right] \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right]$$

Despejando q_B que es el parámetro de interés ya que representa el caudal de sedimentos presentes en la producción total, se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{q_w \left[-70,6 \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right] \right]} = \left[\left(\frac{1}{C_w} \right) + \frac{q_B}{q_w} \right]$$

$$\frac{\Delta P}{\left[-70,6 \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_t r_r^2}{kt} \right) \right] \right]} - \frac{q_w}{C_w} = q_B \quad \left[\frac{\text{bb}}{\text{dia}} \right]$$

La ecuación resultante integra la mayoría de los parámetros enunciados por los autores antes mencionados, lo que hace que genera robustez al modelo.

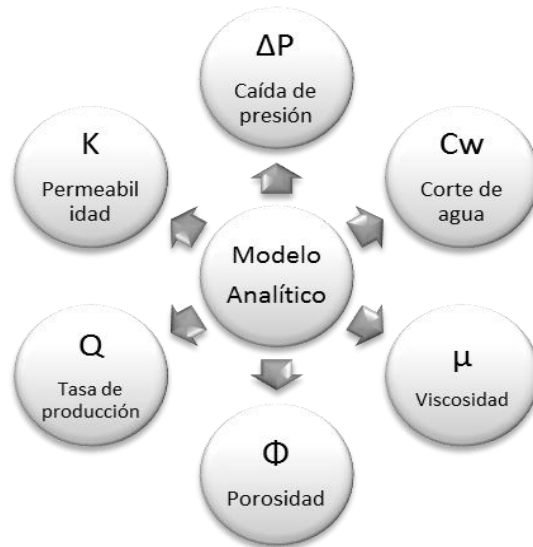


Figura 15. Parámetros involucrados en el modelo cualitativo analítico. El modelo incluye la mayoría de factores relacionados al fenómeno de arenamiento encontrados en la literatura. Fuente: autor.

De modo que si se tiene definido un esquema de producción o una predicción mediante simulación de la cantidad de fluido que se espera del yacimiento, además, que si se dispone de la suficiente información sobre las características de la formación, será posible determinar el comportamiento de la producción de arena a lo largo del tiempo de vida del pozo.

3.2.2 Diagramas de araña modelo cualitativo: Los diagramas de araña son un método para sensibilizar ecuaciones de forma muy sencilla: una propiedad se modifica multiplicándola por un factor multiplicador (0.5, 1 y 1.5) mientras las otras propiedades de la ecuación se mantiene constantes; al graficar estos resultados, se concluye que la variable que tuvo una mayor variación de pendiente será la que tenga mayor influencia en los resultados de la ecuación.

La sensibilización de la ecuación se presenta gráficamente:

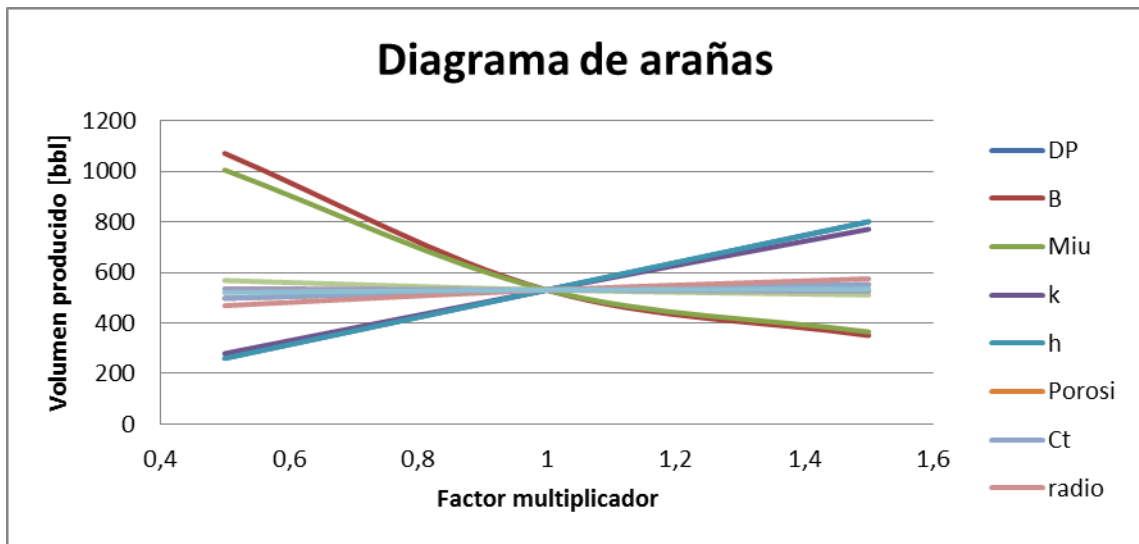


Figura 16. Diagrama de arañas para el modelo predictivo. Sensibilización de los parámetros usados en el modelo predictivo analítico. La sensibilización de cada una de las variables permite el análisis de la magnitud de los efectos de estas sobre la variable respuesta, algunas en mayor proporción que las otras. Fuente: autor.

Los parámetros que tienen un mayor cambio de pendiente son:

- B= Se usa como constante durante el desarrollo en los cálculos por lo tanto su gran variación de pendiente no va a influir en el resultado.
- μ = Se mantiene constante, por lo tanto, al igual que B, su gran variación de pendiente no va a influir en el resultado.
- K= Se usa como constante en los cálculos por lo tanto su variación de pendiente no va a influir en el resultado.
- h= El espesor de la formación no varía por lo tanto en la ecuación se usa como constante.
- ΔP (la línea no se observa pues está debajo de la de h)= sería la única variable que tiene un efecto significativo en la ecuación.

La caída de presión es la que tiene una mayor pendiente y es además de la porosidad, uno de los parámetros que va a variar. A continuación se presentan las pendientes de cada parámetro de mayor a menor.

Propiedad	Pendiente
ΔP	540.51
h	540.5
K	492.17
r	106.37
Ct	54.198
ϕ	54.198
Cw	13.33
qw	-10
t	-57
μ	-640.68
B	-720.68

Tabla 1. Pendiente de las variables usadas en el modelo. Al existir una mayor variación en la pendiente del factor de diseño, también va a haber una mayor variación en los resultados del modelo al mantenerse los otros factores como constantes. Fuente: autor.

Como algunos de los factores incluidos en el diagrama de arañas se mantienen constantes, no van a tener efecto directo sobre el resultado de la arena modelada (q_w); por lo tanto las variables a considerar serán:

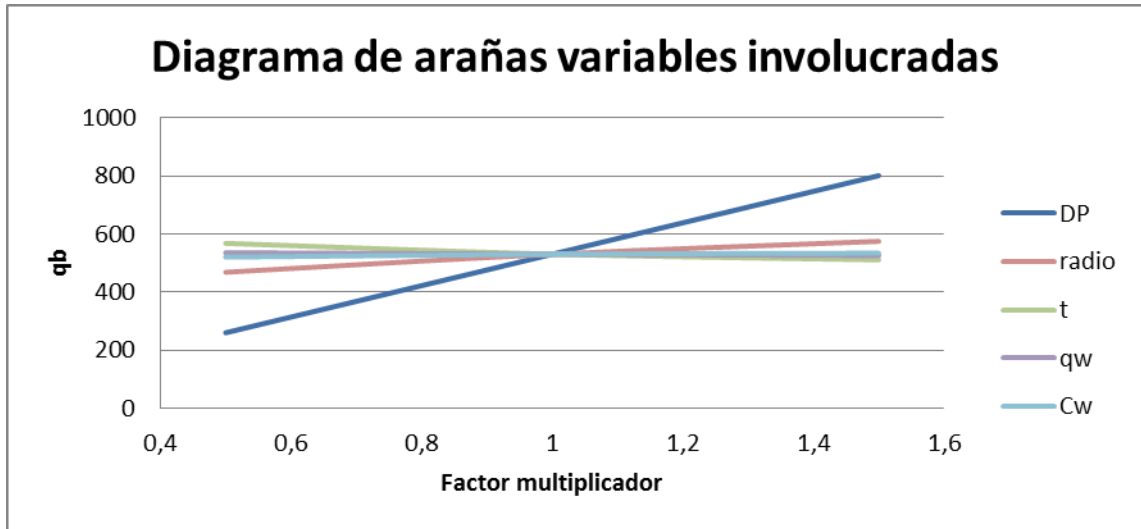


Figura 17. Variación de los factores no constantes del modelo. Algunos factores se asumen como constantes ya que sus variaciones en el transcurso del tiempo son mínimas por lo tanto la variable con mayor influencia en los resultados es la caída de presión como se observa en la gráfica. Fuente: autor.

Las propiedades graficadas con su pendiente correspondiente se refieren de mayor a menor a continuación:

Propiedad	Pendiente
ΔP	540.51
r	106.37
C _w	13.33
q _w	-10
t	-57

Tabla 2. Propiedades variables del modelo predictivo. Los factores que se mantiene constantes no tendrán un efecto real en los resultados, a diferencia de las propiedades variables mencionadas. Fuente: autor.

La caída de presión es la variable que tiene un mayor efecto en la cantidad de arena producida, por lo tanto su respectivo control es fundamental para evitar los problemas ocasionados por este fenómeno.

3.2.3 Modelo cuantitativo analítico: El modelo cualitativo presentado anteriormente muestra el comportamiento de la producción de arena más no la cantidad de esta producida. Para calcular la cantidad de arena que se va a producir es necesario tener por lo menos un evento con el que se pueda estimar cierto volumen de arena en un periodo de tiempo (como mediciones de fondo o eventos de limpieza) ya que no se desea usar pruebas de laboratorio por núcleos por los costos que este tipo de actividades acarrearán.

Al tener algún cálculo de producción de arena se procede a corregir la cantidad de arena predicha por el modelo mediante la siguiente función:

$$q_{sand\ medida\ t1} = q_{sand\ model\ t1} e^{-kt}$$

Teniendo los datos del evento medido ($q_{sand\ medida\ t1}$), el valor de la cantidad de arena modelada inicialmente de forma analítica ($q_{sand\ model\ t1}$) y el intervalo de tiempo, se procede a despejar la constante k , la cual hará ciertos los siguientes resultados a partir de los datos modelados inicialmente ($q_{sand\ model\ t1}$).

$$\frac{\ln\left(\frac{q_{sand\ medida\ t1}}{q_{sand\ model\ t1}}\right)}{t} = -K$$

4. PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGIA

La cronología de actividades para desarrollar una metodología que permita evaluar cuantitativamente los volúmenes de producción de arena es la siguiente:

1. Selección del pozo: Elegir un pozo apto para evaluar el cual debe haber presentado al menos un problema relacionado por arena, además de ello, se deben tener los datos que permitan cuantificarla.
2. Caracterización de las propiedades del pozo: para aplicar el modelo predictivo, se debe contar con la suficiente información petrofísica y de fluidos que se necesitan para usar la función mencionada especialmente los parámetros permeabilidad (K), porosidad (Φ), factor volumétrico (B), viscosidad del fluido (μ), altura de la formación productora (h), compresibilidad de la roca (C_i) y radio del pozo.
3. Definir un esquema de producción: es necesario correr una simulación al pozo para definir la apropiada tasa de producción (tanto de aceite como de agua) a la que va a ser desarrollado el pozo además de la caída de presión que va a sufrir para involucrar estos parámetros en el modelo predictivo.
4. Modelamiento cualitativo y cuantitativo: habiendo definido un esquema de producción (conociendo las tasas de aceite y agua simuladas) junto con la información de petrofísica y de fluidos que caracterizan el pozo, se procede a modelar el comportamiento de la producción de arena mediante la función analítica mencionada anteriormente y/o por el método experimental; estos resultados solo darán un estimativo cualitativo mas no cuantitativo en el caso del modelo analítico aunque son la base para calcular los volúmenes de arena a producir en su respectiva corrección, mientras que con el método experimental se obtienen de inmediato los volúmenes de arena. La función presentada a continuación se usa solo para modelar el comportamiento de la producción de arena.

$$\frac{\Delta P}{\left[-70,6 \frac{B\mu}{kh} \left[\text{Ln} \left(\frac{1688\phi\mu C_r r_w^2}{kt} \right) \right] \right]} - \frac{q_w}{C_w} = q_B \left[\frac{\text{bb}}{\text{dia}} \right]$$

5. Corrección por eventos: Con los cálculos de volúmenes de arena hechos a partir de los eventos o trabajos por problemas de arenamiento, se procede a calcular el factor k con el valor medido en un tiempo 1, y el valor promedio modelado en el mismo tiempo 1. La correlación usada para corregir los datos usados en el modelo de la etapa 4 es el siguiente:

$$q_{sand\ medida\ t1} = q_{sand\ model\ t1} e^{-kt}$$

6. Predecir la cantidad de arena a producir con los valores predichos por el modelo analítico inicial y corregidos mediante el factor K de la función de corrección.

5. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA APLICADA A POZOS POR EVALUAR

5.1 SELECCIÓN DEL POZO A EVALUAR

Los pozos seleccionados fueron L-61 y L-62, estos pozos han presentado múltiples problemas por producción de arena a lo largo de su vida productiva que abarca desde varias décadas a un par de años con el respectivo registro de las actividades realizadas. De estos pozos se conoce la información mencionada (B, k, Φ , μ , h, C_t , radio del pozo) en la metodología y necesaria para modelar la arena a producir.

5.2 ESQUEMA DE PRODUCCIÓN

Para estos pozos no es necesario realizar una simulación para saber la cantidad de fluidos que van a producir ya que se tiene un registro completo de su producción (tanto de aceite y agua) como de la caída de presión que han sufrido durante su vida productiva además de cada actividad de adecuación y evento de mantenimiento del respectivo pozo.

5.3 MODELAMIENTO EXPERIMENTAL

Para el modelo diseñado experimentalmente mediante el método regresión lineal propuesto en el diseño experimental y aplicando el procedimiento matemático se obtiene la ecuación:

$$q_b = -5,615 + 0,00271t + 0,069\Delta P - 8,9q_o$$

La ecuación fue desarrollada con la información del campo L-61, aplicada en el intervalo de valores entre las fechas 14/08/2004 y la fecha 04/06/07 y aplicada a

los registros posteriores a estas fechas dando como resultado los siguientes volúmenes:

L-61							
Fecha	Volumen Medido [ft ³]	Tiempo [hrs]	Draw Down	q _o	q _w	Volumen Modelo Experimental [f ³]	Volumen Acumulado [f ³]
11/11/05	516,8	241200	735,35	9	0	618,7	3390,7
15/12/06	447,9	249840	630,63	10	0	626,0	4016,6
19/04/07	476,6	252720	682,01	15	0	592,8	4609,5
04/06/07	466,6	254160	667,17	11	0	631,3	5240,7
28/12/08	646,0	267120	688,95	14	0	641,2	5882,0
16/02/09	387,6	268560	696,76	15	0	636,8	6518,7

Tabla 3. Arena modelada mediante el método seleccionado en el diseño experimental. **Mediante la ecuación desarrollada por regresión lineal en el diseño experimental se obtienen los valores antes mencionados a partir de múltiples registros de producción de arena; para el volumen acumulado del primer valor fue necesario sumarle 2772 [ft³] que fue el valor medido hasta esa fecha ya que antes de estos eventos ya se habían realizado otras mediciones no tan confiables. Fuente: autor.**

Cabe resaltar que la variable q_w fue eliminada en el proceso matemático ya que en los datos tomados, todos los valores fueron cero (0), hecho que hace anular este valor de la matriz al resolverla.

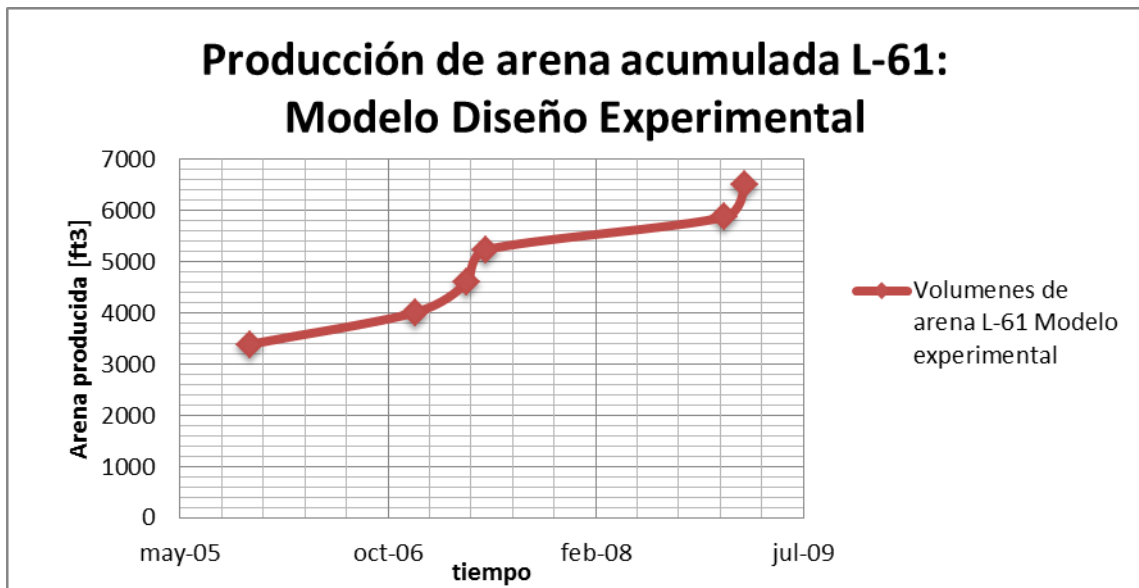


Figura 18. Gráfica de producción de arena modelada mediante el diseño experimental seleccionado. **Fuente:** autor.

Para L-62 no se pudo aplicar el diseño de experimentos seleccionado ya que el registro de actividades reporta solo 3 eventos con los cuales medir la cantidad de arena y para aplicar el modelo es necesario tener $n+1$ datos de producción (donde n equivale a las variables a tener en cuenta: t , ΔP , q_o y q_w).

5.4 MODELAMIENTO ANALÍTICO CUALITATIVO

Con la información recopilada de los pozos se procede a aplicar el modelo cualitativo en los pozos L-61 y L-62 para predecir el comportamiento (de forma cualitativa) de la producción acumulada de arena la cual se presenta a continuación.

5.4.1 L-61: La arena producida en L-61 según los eventos presentó el siguiente comportamiento:

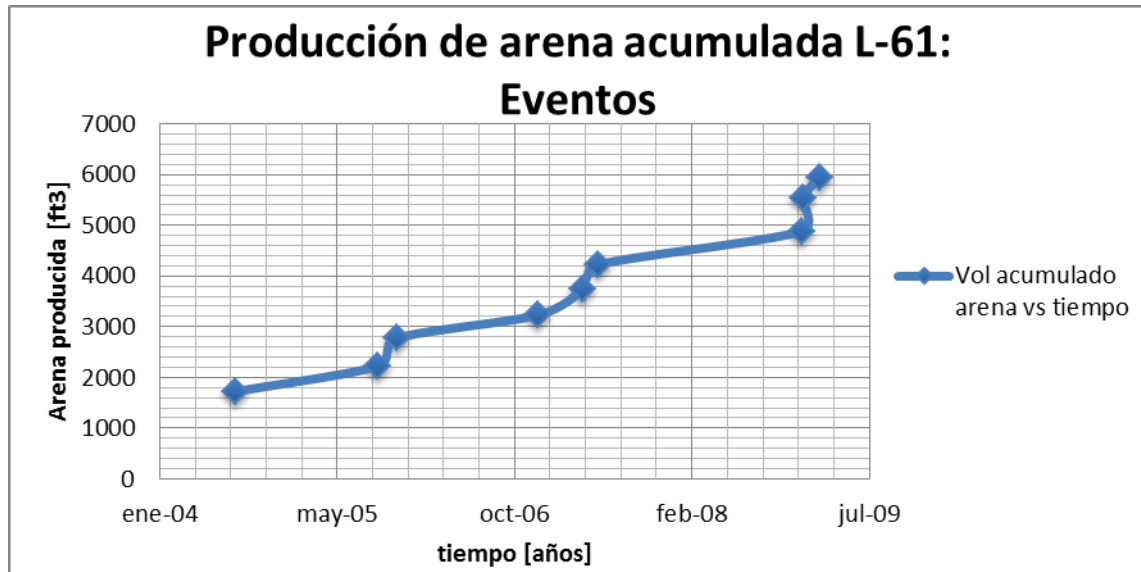


Figura 19. Arena producida en L-61 según eventos. **Fuente:** autor.

Aunque se tenían datos para medir la cantidad de arena producida mediante eventos (calculando el volumen en la tubería a partir de las mediciones de topes, la cantidad de arena asentada en el pozo y corrigiéndola por la velocidad de asentamiento) desde 1978, los valores usados para introducirlos al modelo van desde el 2005 que es la fecha desde donde se tiene un registro certero de las caídas de presión y de la producción del pozo, así se evita usar información errónea o supuesta al mismo tiempo que se minimiza el ruido en los resultados.

Mientras que la arena modelada presento un comportamiento similar a la arena calculada, la magnitud de su volumen no es coherente con los valores medidos.

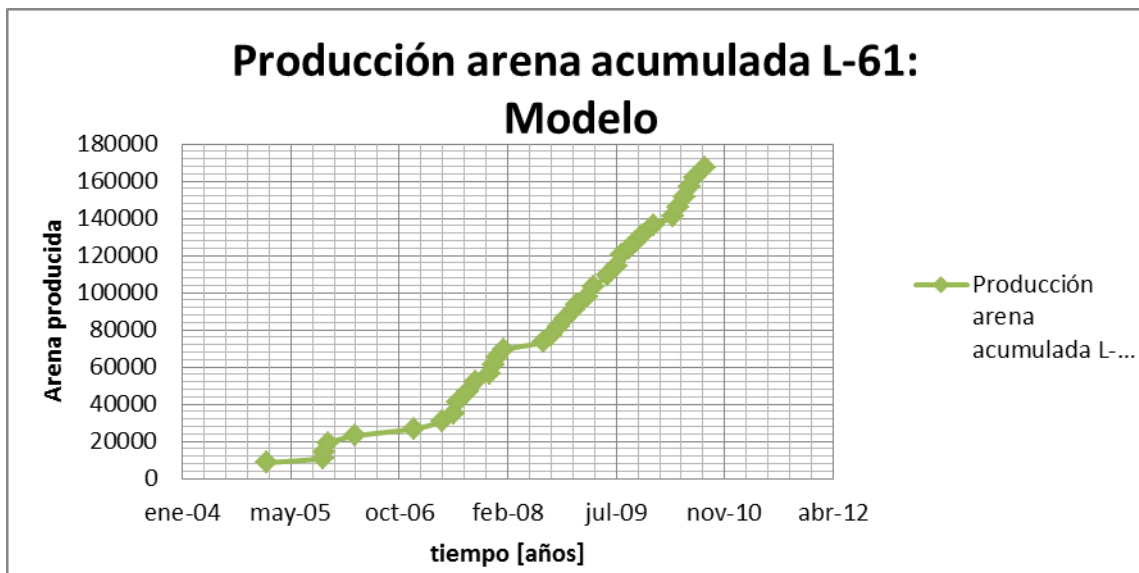


Figura 20. Arena predicha en L-61 según modelo. Fuente: autor.

5.4.2 L-62: Las mediciones realizadas a L-62 se hicieron calculando la arena asentada en la tubería y medida a partir de actividades de toque de fondo en el transcurso de la vida productiva del pozo mediante el uso de la geometría de un cilindro correspondiente a la tubería donde ha quedado atrapada la arena.

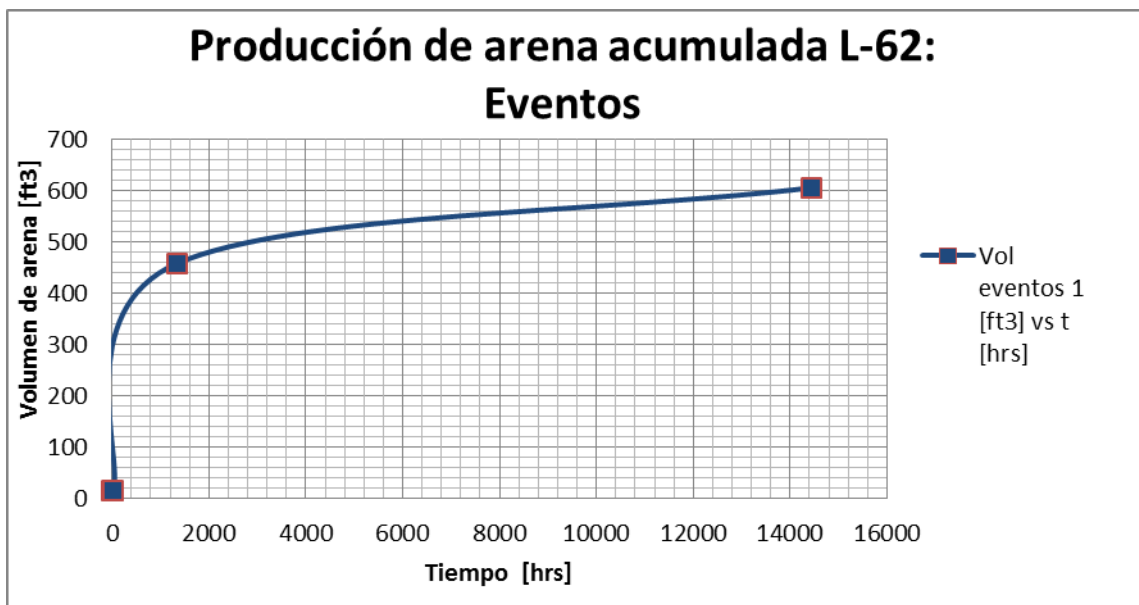


Figura 21. Arena producida en L-62 según eventos. Fuente: autor.

L-62 es un pozo con pocos años de producción y a pesar de ello ha sufrido consecutivamente problemas de arenamiento; los resultados de los datos tomados de L-62 y usados en el modelo se presentan a continuación.

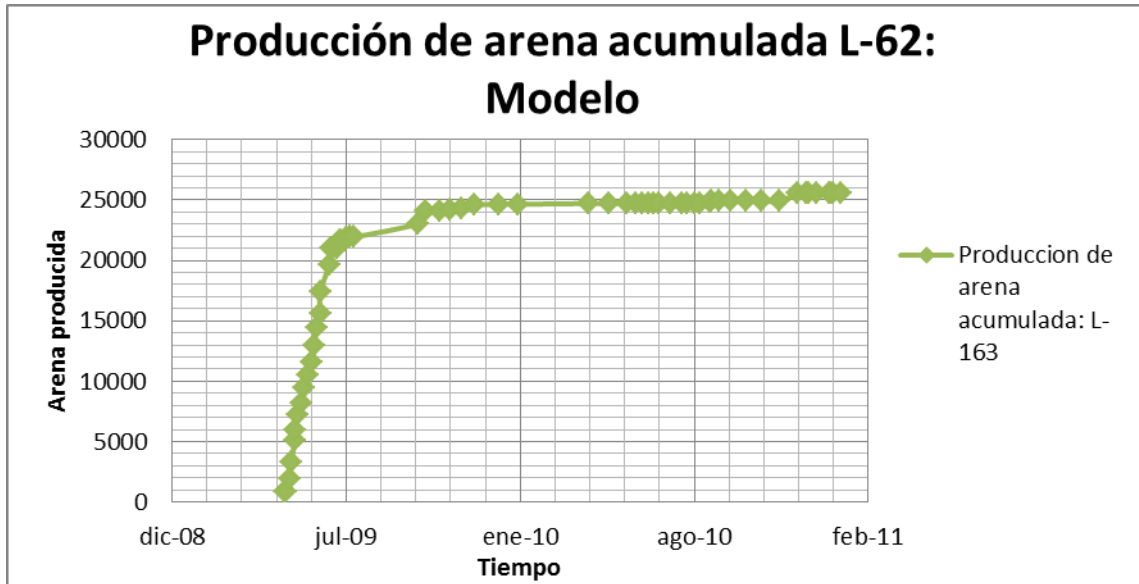


Figura 22. Arena predicha en L-62 según modelo cualitativo. Es claro que la magnitud de la arena modelada no es coherente con los valores calculados pero el comportamiento de la producción del pozo es bastante certero con respecto al comportamiento observado. Fuente: autor.

5.5 CORRECCIÓN POR EVENTOS

Para llevar los valores desfasados del modelo analítico usado anteriormente, se debe calcular un factor k a partir de los eventos realizados(o del primer evento) en el pozo el cual ha permitido calcular el volumen de arena producido en un intervalo de tiempo de operación. Los eventos usados en L-61 y L-62 fueron mediciones de fondo de las cuales se usaran para cálculos los primeros registros y a su vez los más certeros, para minimizar el margen de error en la metodología.

5.5.1 L-61: Los datos usados para L-61 se tomaron en cuenta desde el año 2005 desde donde se tenía un buen registro de caídas de presión y datos de producción.

Fondo	Cálculos de volumen			Corrección por velocidad de asentamiento				
				Tiempo [días]	Arena Prom. Por día [ft3]	Arena Promedio [bls]	% por asentamiento	Vol. Acumulado
Fecha	Diferencia [ft]	Volumen [ft^3]	V. acumulado [ft^3]					
29/05/1978	212	304,4	304,4	118	2,58	0,46	3	305,4
10/08/1978	212	304,4	608,7	71	4,29	0,76	5	625,0
12/08/1984	51	73,2	681,9	2192	0,03	0,01	3	700,4
06/06/1996	350	502,5	1184,4	4266	0,12	0,02	3	1217,9
14/08/2004	340	488,1	1672,5	2948	0,17	0,03	3	1720,7
20/09/2005	344	493,9	2166,4	388	1,27	0,23	3	2229,4
11/11/2005	360	516,8	2683,2	51	10,13	1,80	5	2772,1
15/12/2006	312	447,9	3131,2	394	1,14	0,20	3	3233,4
19/04/2007	332	476,6	3607,8	124	3,84	0,68	5	3733,9
04/06/2007	325	466,6	4074,4	45	10,37	1,85	5	4223,8
28/12/2008	450	646,0	4720,4	554	1,17	0,21	3	4889,2
30/12/2008	376	539,8	5260,2	2	269,90	48,07	20	5537,0
16/02/2009	270	387,6	5647,9	46	8,43	1,50	5	5944,0

Tabla 4. Registro de producción de arena L-61. A partir de las mediciones de fondo durante la vida productiva del pozo y conociendo el diámetro de la tubería, se calculó la cantidad de arena que se produjo y se corrigió según la velocidad de asentamiento. Fuente: autor.

Siguiendo la metodología planteada, al tener un primer y/o único dato de arena producida medida se puede hacer una regresión exponencial y obtener los resultados consecutivos. El siguiente es el cálculo para L-61 del factor k en la fecha 11/11/05 y 15/12/06 con los respectivos valores calculados de arena; no se tomaron en cuenta los datos anteriores ya que estos datos no eran muy fiables.

$$q_{san\ medida\ t1} = q_{sand\ modelada\ t1} e^{-kt}$$

$$(3233 - 2772) = \left(\frac{23985 - 16081}{1} \right) e^{-k249840}$$

$$k = 1,1 \times 10^{-5}$$

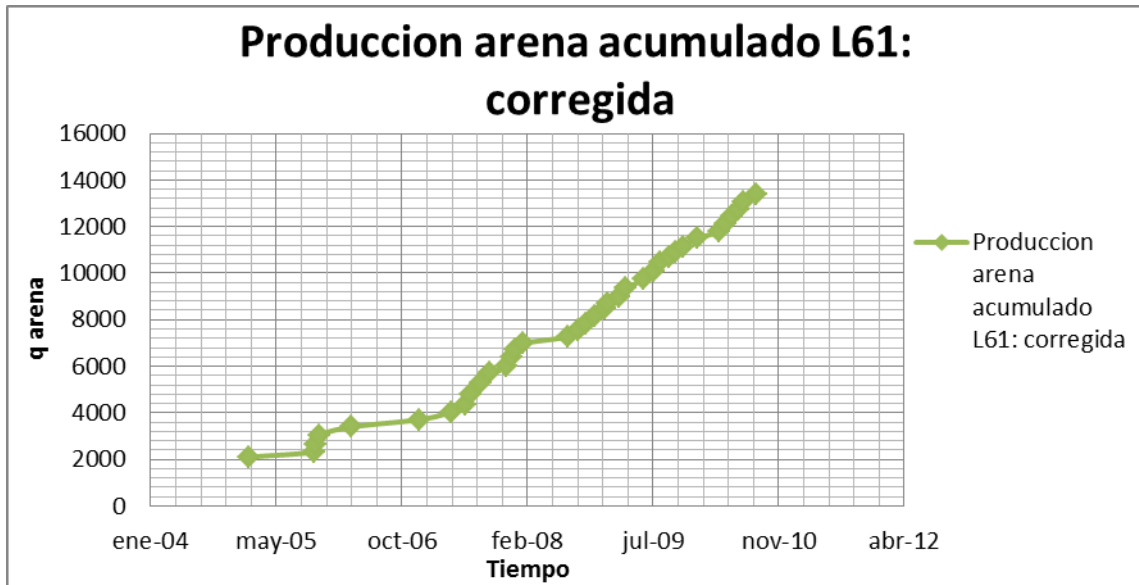


Figura 23. Arena producida en L-61 según modelo cualitativo-correcto. **El comportamiento de la producción acumulada de arena se mantiene fiel a los valores registrados y los valores predichos al usar un solo dato de producción son bastante próximos a los calculados según eventos.** Fuente: autor.

5.5.2 L-62: El pozo L-62 es un pozo relativamente nuevo y desde el comienzo de su vida productiva ha llevado un registro de los eventos y de la producción que ha tenido, por el hecho de ser reciente, el uso de herramientas más precisas minimiza el margen de error en las lecturas y respectivos registros.

Fondo	Cálculos de volumen			Corrección por velocidad de asentamiento				
	Eventos		V.	Tiempo [días]	Arena	Arena	% por	Vol.
Fecha	Diferencia [ft]	Volumen [ft^3]	acumula do		Promedio día [ft3]	Promedio [bls]	asentamient o	Acumulad o
14/04/2009	0	0,00	14,76	1	0,00	0,00	0,00	14,76
10/06/2009	265	434,52	449,28	56	7,76	1,38	2,00	457,97
16/12/2010	90	147,57	596,86	602	0,25	0,04	0,00	605,55

Tabla 5. Registro de producción de arena L-62. Las mediciones de fondo durante la vida productiva del pozo permitieron evaluar la cantidad de arena que había producido L-62. Fuente: autor.

Por ser un pozo reciente y por la fidelidad de sus datos (además de los pocos existentes) los volúmenes de arena calculados se aproximan más a la realidad, hecho que hace más robusto el posterior análisis de resultados. El dato tomado fue la cantidad de arena en la fecha 14/04/2009 ya que es el primer dato de producción de arena registrado (para este caso no es necesario calcular la cantidad producida en un intervalo ya que al comenzar desde cero (0) el valor a restar sería cero (0) al igual que el tiempo), con esta cantidad de arena se determinó k .

$$q_{san\ medida\ t1} = q_{sand\ modelada\ t1} e^{-kt}$$

$$(2,63) = \left(\frac{1688}{8}\right) e^{-k864}$$

$$k = 5,01 \times 10^{-3}$$

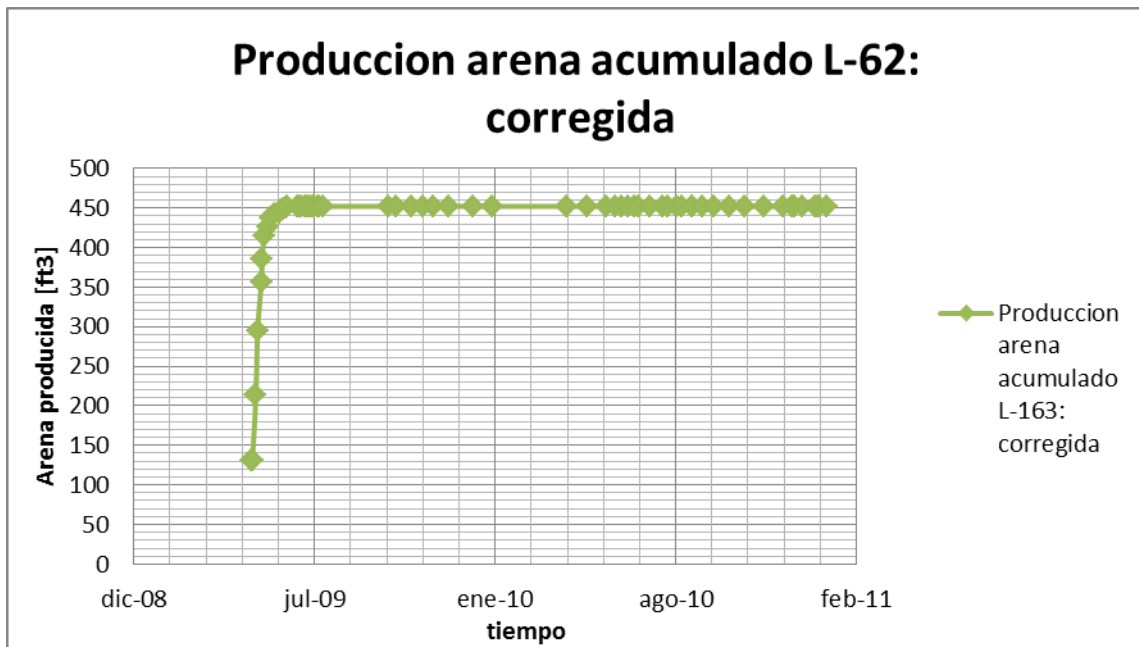


Figura 24. Arena producida en L-62 según modelo cualitativo-correcto. **El comportamiento de la producción acumulada fiel a los valores registrados y los valores predichos al usar el primer dato de producción son bastante próximos a los valores calculados según eventos.** Fuente: autor.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Los modelos desarrollados se adaptaron fielmente a de forma cualitativa a los volúmenes de arena medidos y aunque los métodos usados para desarrollar ambos modelos fueron muy diferentes, los resultados cuantitativos modelados estuvieron muy cercanos a los volúmenes calculados mediante los eventos de medición.

Para L-61 el modelo experimental presenta magnitudes más distantes a la cantidad de arena medida por eventos al comienzo de la predicción, que los volúmenes predichos por el modelo analítico corregido; al final de la predicción el modelo analítico corregido tiene una mayor diferencia ante la arena medida que el modelo experimental, el cual, mantiene una tendencia estándar.

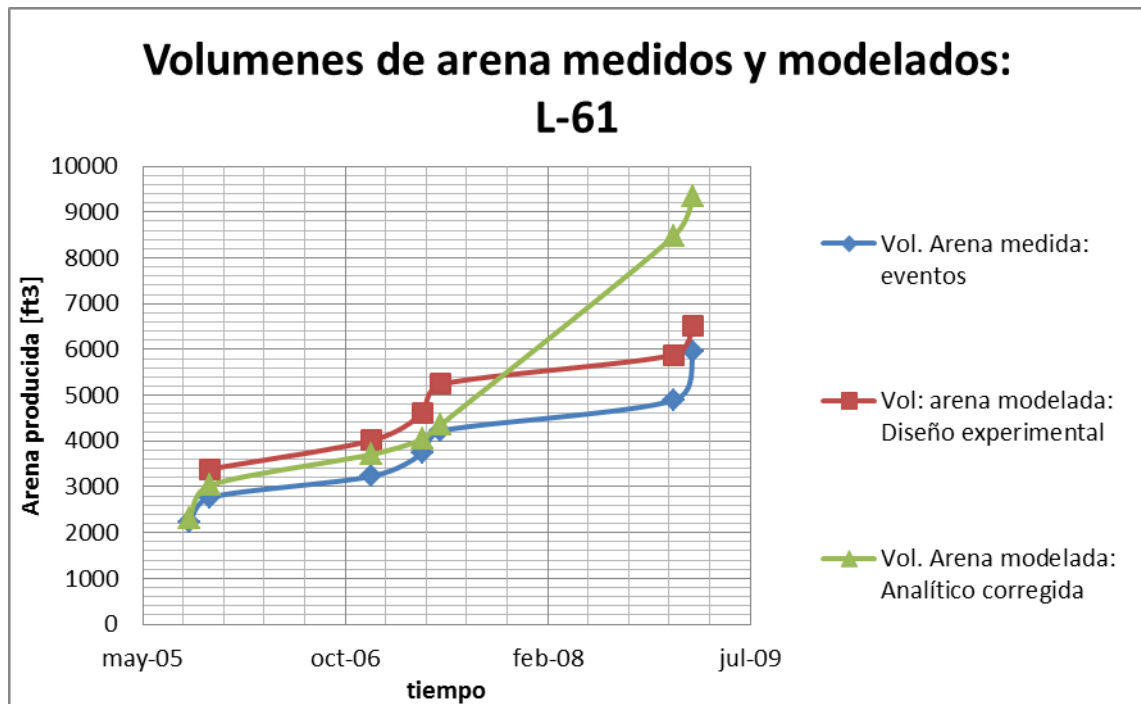


Figura 25. Volúmenes de arena producida y modelada mediante el diseño experimental y el método analítico para L-61. Cuantitativamente ambos modelos se adaptan al comportamiento de los volúmenes registrados y calculados en los eventos; el modelo experimental en un principio está más alejado de los volúmenes medidos mientras que el modelo analítico corregido es más fiel a la cantidad de arena medida, al final el modelo analítico se aleja del volumen calculado mientras que lo arena modelada experimentalmente mantiene su tendencia. Fuente: autor.

El pozo L-61 únicamente pudo ser evaluado por el modelo analítico-correcto ya que solo existían tres registros de operaciones relacionados con producción de arena, por lo tanto, el modelo de regresión seleccionado mediante el diseño experimental no es aplicable para esta situación ya que se hubieran necesitado por lo menos cinco registros de producción de arena. La cantidad de arena predicha por el modelo analítico-correcto varía sustancialmente manteniendo un comportamiento similar a lo sucedido con el pozo L-61 en el que al avanzar la predicción, se distancian los valores medidos con los valores modelados; cabe resaltar que aunque la diferencia es sustancial no deja de ser viable el modelo analítico debido a que los valores predichos no son valores incoherentes y la diferencia no es un valor de magnitudes astronómicas.

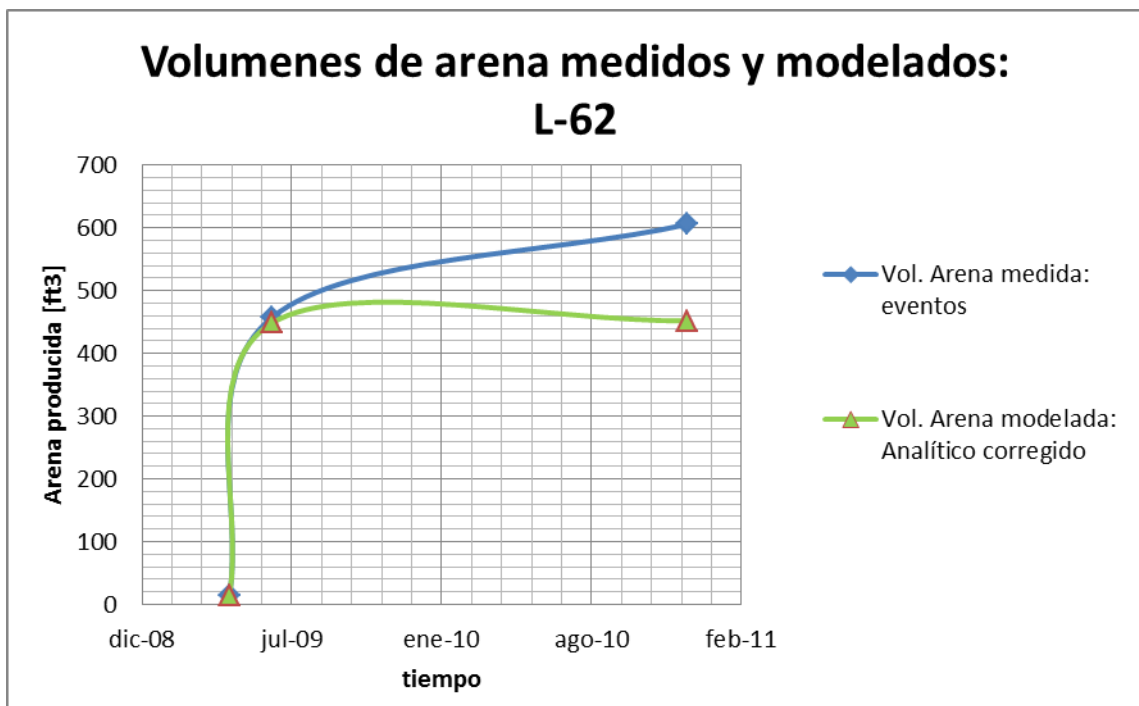


Figura 26. Volúmenes de arena producidos y modelados mediante el método analítico para L-62. *El pozo evaluado no contaba con la suficiente información para desarrollar un modelo de forma experimental, el modelo usado fue el analítico-correcto el cual se mantiene fiel en su tendencia respecto a L-61 de mantener un comportamiento cualitativo certero y desviarse de los volúmenes reales al final de la predicción.* Fuente: autor.

Para el pozo L-61, el comportamiento de los dos modelos (diseñado experimentalmente y el analítico corregido) se adapta al comportamiento de la

producción de arena mostrado en dicho pozo y en un principio las magnitudes no difieren sustancialmente; para el modelo analítico corregido existe un aumento significativo de la cantidad de arena predicha al final del modelamiento, comportamiento que no sucede con el modelo diseñado experimentalmente ya que este tiene en cuenta más datos que el modelo analítico corregido (que solo usa el primer dato). El hecho de que los volúmenes predichos varíen hace que la diferencia entre los valores modelados y medidos, mantengan cierto rango de error el cual se muestra a continuación:

L-61					
Fecha	Arena medida [ft ³]	Modelo experimental		Modelo Analítico corregido	
		Volumen	% Error	Volumen	% Error
20/09/2005	2229,4	--	--	2320	4,1
11/11/2005	2772,1	3390,7	22,3	3039	9,6
15/12/2006	3233,4	4016,6	24,2	3711	14,8
19/04/2007	3733,9	4609,5	23,4	4042	8,3
04/06/2007	4223,8	5240,7	24,1	4363	3,3
16/02/2009	5944,0	6518,7	9,7	9353	57,4
		Promedio	20,7	Promedio	24,4

Tabla 6. Diferencia promedio entre la arena medida y modelada en el pozo L-61. **Los volúmenes de arena modelados mediante ambos métodos son cercanos a los valores medidos en el pozo pero no son del todo certeros; el modelo experimental mantiene un porcentaje de error alto pero constante mientras el porcentaje de error del modelo analítico aumenta progresivamente desde valores muy bajos.** Fuente: autor.

Mientras que el porcentaje de error de L-61 para el modelo experimental prácticamente se mantiene, el modelo analítico mantiene un margen de error bajo al comienzo de la predicción y aumenta significativamente al final del intervalo de tiempo. La discordancia al final del intervalo entre los volúmenes medidos y los volúmenes predichos por el modelo analítico corregido se deben al hecho que en

este mismo periodo de tiempo, el pozo fue sometido a múltiples intervenciones, lo que obligó a detener su producción frecuentemente; las actividades relacionadas son cambios de bomba por arenamiento como se observa en la figura 6, hecho que da validez a la idea de un aumento en la producción de arena y que respectivamente fue opacado y mitigado con los tiempos no productivos en dichas intervenciones.

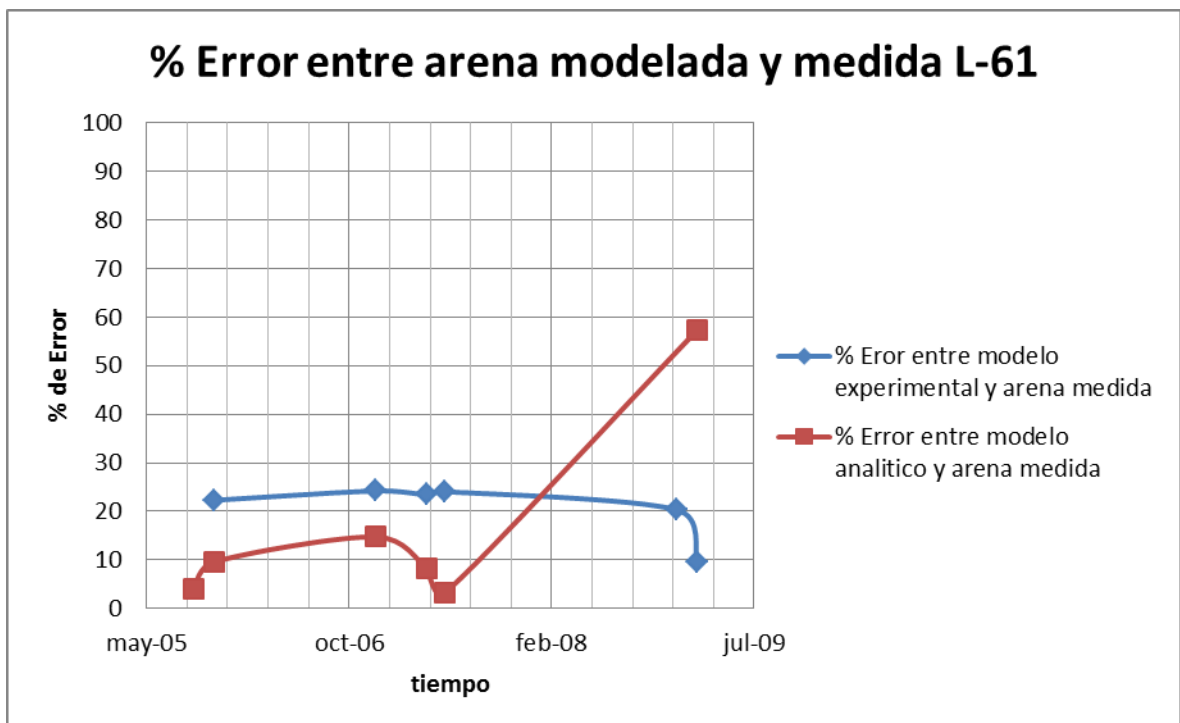


Figura 27. Porcentaje de error entre arena medida por eventos y modelo experimental junto con modelo analítico para L-61. La diferencia entre los valores modelados y medidos para el modelo analítico es baja en principio y aumenta al final de la predicción, comportamiento adverso al modelo experimental. Fuente: autor.

En L-62 no se compararon los dos modelos predictivos ya que no existían datos suficientes para generar el modelo diseñado experimentalmente, debido a ello solo se analizó la diferencia entre los valores medidos y los valores predichos mediante el modelo analítico experimental.

L-62					
Fecha	Arena medida [ft ³]	Modelo experimental		Modelo Analítico corregido	
		Volumen	% Error	Volumen	% Error
14/04/2009	15	--	--	15	0,0
10/06/2009	458	--	--	449	2,0
16/12/2010	606	--	--	452	25,4

Tabla 7. Diferencia promedio entre la arena medida y modelada en el pozo L-62. **La ausencia de valores modelados mediante el método experimental debido a la limitante del número de datos necesarios para desarrollar este tipo de diseños hace que solo se pueda comparar el valor modelado mediante el método analítico con la cantidad de arena medida mediante eventos.** Fuente: autor.

El modelo analítico corregido en L-62 mantiene un comportamiento fiel al modelo corregido aplicado a L-61 en el que el porcentaje de error avanza con el tiempo usado en la predicción pero se mantiene en un rango aceptable.

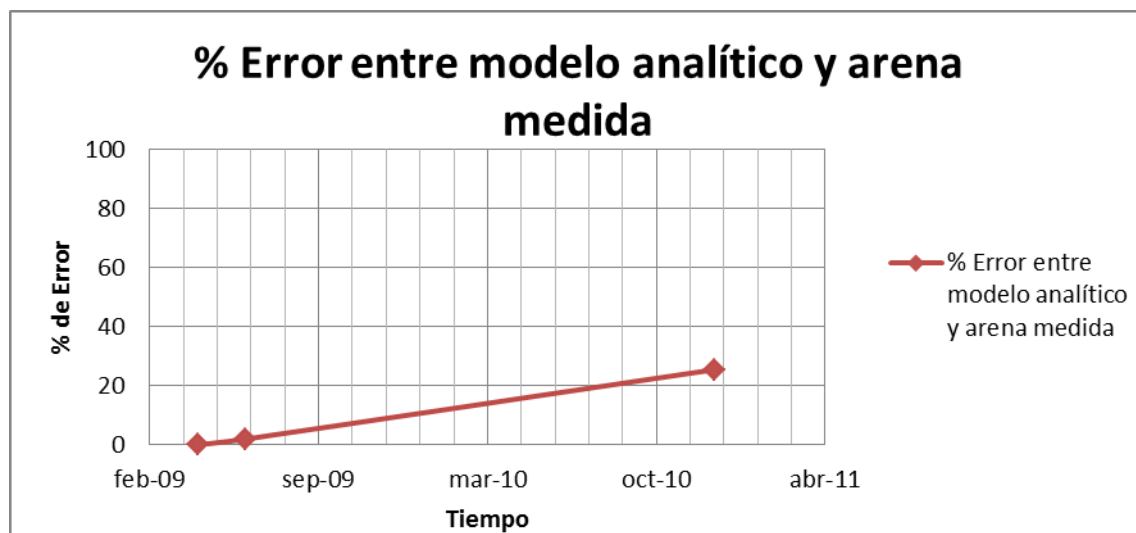


Figura 28. Porcentaje de error entre arena medida por eventos y modelo experimental junto con modelo analítico para L-62. **La diferencia entre los valores modelados y medidos para el modelo analítico es baja en principio y aumenta al final de la predicción, comportamiento adverso al modelo experimental.** Fuente: autor.

Los resultados indican que el ambos modelos son bastante certeros excepto en el caso del pozo L-62 el cual la ausencia de abundantes datos no permitió generar el modelo desarrollado experimentalmente, hecho que limita el uso de este tipo de

modelos en la metodología planteada y que hace más viable el uso del modelo analítico-correcto para una predicción de volúmenes futuros de arena.

CONCLUSIONES

- El modelo desarrollado mediante el diseño experimental a pesar de ser bastante certero tiene como limitante que necesita un extenso registro de arena producida para poder generar una ecuación, hecho que se distancia con los intereses de una predicción.
- El modelo analítico-correcto tiene menos limitantes que el modelo desarrollado mediante el diseño experimental ya que la ausencia de datos de producción de arena no condiciona una evaluación cualitativa del potencial de arena que puede tener el pozo.
- El hecho de necesitar solo un dato de producción de arena para el modelo analítico correcto lo hace más viable y práctico respecto al modelo diseñado experimentalmente que necesita de por lo menos 5 registros de producción de arena con sus respectivas tasas de producción y caída de presión.
- La predicción cuantitativa hecha por el modelo analítico es aplicable a cualquier pozo bien caracterizado ya que solo es necesario definir un esquema de producción y la respectiva caída de presión a la que va a ser sometido para saber el comportamiento de la producción de arena.
- La caída de presión es el factor controlable más relevante para manejar el caudal de arena a producir según lo sensibilizado en la ecuación y lo encontrado en la literatura excluyendo las características geológicas y petrofísicas de la formación productora.

- EL modelo predictivo permite corregir las tasas de producción y la caída de presión a la que va a ser sometido el pozo durante su desarrollo, y así evitar el incremento de la tasa de producción de arena.
- Para dar mayor exactitud estadística se recomienda hacer más pruebas con múltiples pozos a quién desee implementar la metodología mediante el modelo analítico corregido debido a que éste, aunque tomo un gran número de datos, fue aplicado a únicamente dos pozos.

BIBLIOGRAFIA

1. "SAND CONTROL TROUGHT LINEAR FRAC PACK (LGFP) TECHNIQUE: CASE HISTORIES (CUENCA DEL CASANARE, COLOMBIA)"; Orozco D., Ramírez J., Perenco; Cadena R., Rodríguez L., Halliburton; ACIPET, 2007.
2. "INTELLIGENT SAND MANAGEMENT"; Oyenehin Bobs, Macleoid Chris, Oluyeme Gbenga, Robert Gordon University, Onuku Anthony, Vetco-Gran Limited; SPE, 2005.
3. "MÉTODOS DE CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA SIN CEDAZOS"; Acock Andrew, Heitmann Norbert, Hoover Steve, Zia Malik Badar, Pitoni Enzo, Riddles Claud, Solares Ricardo; Oilfield Review; 2003.
4. "RECUPERACIÓN DEL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA"; Armentor Ricky and Wise Michael, Chevron USA Inc.; Bowman Mike, Nueva Orleans, Luisiana; Cavazzoli Gustavo, Rio de Janeiro, Brasil; Collin Gildas, and Rodet Vincent, Perenco; Holicek Bob, Houston , Texas; King George, BP; Lockyear Chris, BP; Parlar Mehmet, Rosharon Texas; Oilfield Review, Otoño de 2007.
5. "A MORE REALISTIC SAND PRODUCTION PREDICTIN USING PORE COLAPSE THEORY"; M.R. Awal, M. Azeemuddin, M.S. Khan, A. Abdulraheem & M.A. Mohiuddin, Center for Petroleum & Minerals, The Rresearch Institute, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahram, Saudi Arabia; Rock Mechanics in the National Interest, Elsworth, Tinucci & Heasley, 2001.
6. "INTEGRATED SOIL AND ROCK MECHANICS: A MAJOR STEP TOWARDS CONSISTENT AND IMPROVED SAND PRODUCTION PREDICTION AND

- MANAGEMENT”; Hans H. Vazin, BP America Inc., E&P Technology Group, Houston, TX, USA, ARMA 2004.
7. “SAND PRODUCTION PREDICTION STUDY FOR A MULTIFIELD GAS DEVELOPMENT”; Wu, B., CSIRO Petroleum, Perth, Australia, Yaakulo, M.A., PETRONAS Research & Scientific Services Sdn Bhd, Kuala Lumpur, Malaysia, Tan, C. P., CSIRO Petroleum, Perth, Australia, Yeon, L. M. & Johar, Z., PETRONAS C S.B., Kuala Lumpur, Malaysia; ARMA 2004.
 8. “A CASE STUDY OF ROCK-MECHANICAL PROPERTY EVALUATION AND SANDING ANALYSIS IN VERY POROUS HYDROCARBON-BEARING SANDS”; T. Klimentos (Schlumberger) & S. Hassan (Petrobel), SPWLA 42 Annual Logging Symposium, June 17-20, 2001.
 9. “SAND PREDICTION: A PRACTICAL FINITE-ELEMENT 3D APPROACH FOR REAL FIELD APPLICATIONS”; Volontè G., Scarfato F. & Brignoli M.; SPE 134464, eni e&p, 2010.
 10. “METODOS PRACTICOS DE MANEJO DE LA PRODUCCION DE ARENA”; Acock A, Orourke T., Shiberdeen, Escocia; Alexander J., Abu Dhabi, EAU; Andersen G.; Unocal; Texas, USA; Kaneko T., Venkitaraman; Houston, Texas; Cardenas J.; Rosharon, Texas; et al.; Oilfield Review, Verano 2004.
 11. “ROCK MECHANICS PRINCIPLES AND ENGINEERING APPLICATIONS”, S.A.B. Dafontoura, 1980.
 12. “PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA EN EL CAMPO MADURO DEL VALLE DEL MAGDALENA MEDIO “LLANITO”, A PARTIR DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS Y GEOMECÁNICAS DE LAS FORMACIONES PRODUCTORAS”, Jessica Marcela Goyeneche Rodríguez & Ruby Lorena Hernández Pico, Tesis de grado, UIS, Bucaramanga, 2009.

13. "ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN LOS POZOS DEL ACTIVO LLANITO DE ECOPEPETROL S.A. PARA DETERMINAR EL ARRASTRE O LA DEPOSITACION DE LA PRODUCCION DE ARENA"; Andrés Hernando Camacho Forero & Yudy Paola Villamizar Ariza; Tesis de grado, UIS, Bucaramanga, 2010.
14. "PETROLEUM RELATED ROCK MECHANICS", 2 Edition, E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen & R. Risnes, Elsevier, 2008.
15. "FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA", Álvarez M., Fac. Ingenierías Físicoquímicas, Esc. de Geología, UIS, 2004.
16. "IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA PARA EL MANEJO DE LA INTEGRIDAD DE POZOS PRODUCTORES DE LAS AREAS LISAMA Y LLANITO DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES DE MARES, DE LA GERENCIA REGIONAL MAGDALENA MEDIO DE ECOPEPETROL S.A.", Gonzáles & Romero, Tesis de grado UIS, 2011.
17. "DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS", Montgomery D., Universidad Estatal de Arizona, Limusa Wiley, 2004.
18. "WELL TESTING"; Lee John, Texas A&M University, SPE, 1982.