

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS FORMACIONES CABALLOS Y VILLETA DEL CAMPO LORO, CUENCA DEL PUTUMAYO<sup>1</sup>

Grupo de Investigación: SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS Y RECOBRO MEJORADO

*Juan Manuel Lacayo<sup>\*\*</sup>, Laura Perez, Edwin Rodriguez<sup>\*\*\*</sup>  
Cindy Alexandra Camacho Pérez<sup>\*\*\*</sup>, Leandro Uriel Gómez Barbosa<sup>\*\*\*</sup>*

## RESUMEN

Para el desarrollo de la simulación de las Formaciones Caballos y Villeta en el Campo Loro fue necesario realizar una nueva interpretación petrofísica en cada uno de los pozos para obtener el NTG, la porosidad efectiva y la permeabilidad absoluta, lo cual definió el modelo estático de la simulación; el modelo dinámico se estableció a partir de la carga de la producción histórica del Campo, las curvas de permeabilidad relativa para cada formación, la presión al datum, la profundidad de los contactos agua - aceite, la definición y tamaño de los acuíferos y los estados mecánicos de cada uno de los pozos. Luego de inicializarlo, arrojó como resultado el OOIP del modelo, el cual fue comparado con las reservas resultantes obtenidas a partir del método de Balance de Materiales. Con respecto a la Formación Villeta, sólo se pudo realizar un modelo analítico de la Unidad T de la misma, por falta de datos pertenecientes al modelo dinámico del yacimiento. El ajuste histórico para la Formación Caballos se obtuvo después de 90 corridas y arrojó una incertidumbre en la producción de aceite de 4.67%, mientras que para la producción de agua fue de 43.43%.

A partir de los resultados finales del ajuste histórico, se decidió realizar una corrida de predicción desde el año 2008 hasta el año 2030, obteniendo como resultados, el eficiente drenaje de las reservas de la Unidad U2 y un almacenamiento potencial de hidrocarburos en la zona norte de la Unidad U3.

Fecha de recibido: 04 de febrero de 2010      Fecha de aprobación: 19 de octubre de 2010

\* Este proyecto fue desarrollado, a través de un convenio de Cooperación Tecnológica con el Instituto Colombiano del Petróleo.

\*\* Docente investigador, grupo de Recobro Mejorado, Universidad de América.

\*\*\* Estudiantes coinvestigadores Universidad de América.

**Palabras clave:** Formación Caballos, Formación Villeta, Campo Loro, simulación de yacimientos, Computer Modelling Group, Arena T Formación Villeta, Cuenca del Putumayo.

#### ABSTRACT

For the development of the simulation of the Caballos and Villeta's Formation in the Loro Field it was necessary to make a new petrophysics interpretation in each one of wells to obtain the Net to Gross, the effective porosity and the absolute permeability, which defined the static model of the simulation; the dynamic model settled down from the load of the historical production of the Field, the curves of relative permeability for each formation, the pressure to the datum, the depth of the oil – water contact, the definition and size of the aquifers and the mechanical states of each one of wells. Later, it proceeded to initialize throwing it the OOIP result of the model, which was compared with the obtained resulting reserves from the method of Material Balance. About to the Villeta Formation, single an analytical model of Unit T of the same one could be made, by lack of data pertaining to the dynamic model of the reservoir. The history match for the Caballos Formation was obtained after 90 runs and it throw an uncertainty in the oil production of 4,67%, whereas for the water production it was of 43,43%.

From the final results of the history match, it was decided to make a prediction run from year 2008 to year 2030, having like results the efficient drainage of the reserves of the U2 Unit and potential hydrocarbon storage in the North zone of the U3 Unit.

**Key words:** Caballos Formation, Villeta Formation, Loro Field, Reservoir Simulation, Computer Modelling Group, T sand Villeta Formation, Putumayo Basin.

## INTRODUCCIÓN

El Campo Loro ubicado en la Cuenca del Putumayo cuenta con trece pozos (Loro 1, Loro 2A, Loro 3, Loro 4, Loro 5A, Loro 6, Loro 7, Loro 7A, Loro 8, Loro 9D, Loro 10, Loro 11 y Loro 12D), ubicados a lo largo de la falla Loro – Hormiga que sirve como sello para la estructura.

La simulación numérica de las Formaciones Caballos y Villeta es el primer paso y el más importante para reproducir el flujo de fluidos a través del medio poroso, lo cual será base fundamental para la toma de decisiones técnico – económicas que beneficien el desarrollo del Campo Loro.

Desde la explotación de El Campo Loro se han presentado distintas dificultades relacionadas con la definición de la estructura de los yacimientos, viéndose como necesidad la re – interpretación del modelo sísmico generado para los Campos Puerto Colón y Loro; además, los graves problemas de daño de formación que sufrían la mayoría de los pozos que obligaban a realizar diferentes tipos de trabajos de estimulación, los cuales demandaban altos costos para la compañía, disminuyó el éxito en la campañas de perforación realizadas en años anteriores.

La meta principal de este proyecto de grado es generar un modelo numérico de las Formaciones Caballos y Villeta, realizando la respectiva actualización del modelo estático y el dinámico, para poder aclarar los aspectos anteriormente mencionados.

La re – evaluación del Aceite Original In Situ (OOIP), el ajuste histórico del modelo y la elaboración de predicciones básicas, son los parámetros que se van a tener en cuenta en el camino metodológico, más adecuado, para desarrollar el proyecto y el que asegura una excelente investigación que será tenida en cuenta para el eficaz mejoramiento de la producción y el recobro de hidrocarburos en el Campo por parte de la empresa operadora (ECOPETROL S.A.).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder desarrollar este trabajo se necesitó del manejo de los siguientes programas:

- EXCEL
- GEOGRAPHIX (Prizm y Well Base)
- Oil Field Manager
- Crystal Ball
- SURFER
- CMG (Builder, Imex y Results)

Los programas, a excepción del último, se obtuvieron a través de ECOPETROL S. A.; con respecto a CMG fue facilitada una licencia demo por espacio de un año.

Estos programas poseen las siguientes características:

- **EXCEL.** Es una herramienta de *Microsoft Office* que permite realizar toda serie de cálculos matemáticos, estadísticos y analíticos para la elaboración de algoritmos lógicos con el propósito de obtener una respuesta numérica.
- **GEOGRAPHIX (Prizm y Well Base).** Es un programa de la empresa HALLIBURTON el cual, en sus aplicaciones Prizm y Well Base, permite la carga e interpretación de los registros eléctricos de los pozos de un campo.
- **Oil Field Manager.** Es un programa de la empresa SCHLUMBERGER que se encarga de la generación y administración de la base de datos de producción de fluidos de un campo petrolero y de la elaboración de predicciones en la producción de cada pozo o del campo.
- **Crystal Ball.** Programa de la empresa ORACLE que genera distribuciones probabilísticas de una población para la escogencia de los datos más representativos.

- **SURFER.** Programa especializado en la realización de mapas de contorno y grillas tridimensionales; utiliza métodos geoestadísticos para la carga del modelo estático de una simulación.
- **CMG (Builder, Imex y Results).** Programa de simulación de Yacimientos de la empresa *Computer Modelling Group*; se encarga de modelar un yacimiento petrolero teniendo en cuenta sus parámetros estáticos y dinámicos para poder realizar predicciones futuras en la producción de fluidos.

Para realizar el modelo de simulación fue necesario realizar los siguientes pasos:

1. **Análisis de variables.** Consiste en la indagación y estudio de todos los parámetros relacionados con los modelos estático y dinámico, teniendo en cuenta la historia de producción de cada pozo y la caracterización de las formaciones productoras a partir de los registros eléctricos.
2. **Actualización del modelo estático y dinámico.** Consiste en interpretar los registros eléctricos de los pozos y realizar los mapas de distribución de cada una de las propiedades (porosidad efectiva, permeabilidad absoluta y NTG) a partir de datos seleccionados utilizando distribución de probabilidad y métodos geoestadísticos.
3. **Simulación.** Es la carga de los modelos estático y dinámico; el modelo estático está compuesto por la construcción de la grilla de simulación, que se realiza directamente en el simulador o puede ser importada de un programa especializado; los mapas realizados anteriormente que se cargan en dicha grilla, de la presión capilar del yacimiento y la compresibilidad de la formación; el modelo dinámico se compone de la historia de producción del campo; los estados mecánicos de los pozos; las curvas de permeabilidad relativa del yacimiento; las propiedades PVT de la formación; la ubicación de los contactos agua – aceite y la definición del tamaño y ubicación de los acuíferos en el modelo.

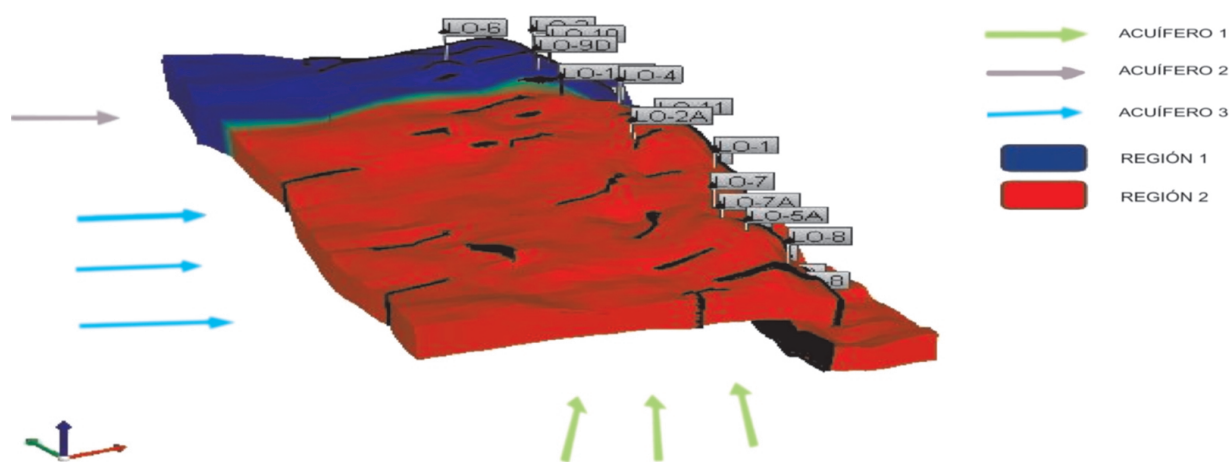
Para el presente proyecto fue necesario realizar dos modelos de simulación que corresponden a cada una de las formaciones mencionadas al principio; esta decisión se basó en el hecho de que la Formación Villeta carecía de suficiente información dinámica y estática que permitiera realizar un ajuste confiable de sus producciones y, por ende, de futuras predicciones.

4. **Inicialización.** Luego de haber cargado los modelos estático y dinámico se procede a la primera corrida de simulación que se conoce como inicialización del modelo, en ésta se puede obtener el valor del aceite original *in situ* del yacimiento a partir de la distribución de las saturaciones y presiones en el modelo; antes de poner en producción el yacimiento, es necesario realizar ajustes en algunas propiedades petrofísicas para poder obtener el valor más cercano al valor real de OOIP.
5. **Ajuste histórico.** Es la modificación de parámetros que se encuentran relacionados con la producción del campo para obtener valores cercanos a los históricos reales de la misma; es importante tener en cuenta que dichos ajustes se deben hacer siguiendo parámetros físicos que permitan que los cambios no sean desproporcionados con la realidad y que puedan ser justificados mediante las leyes de flujo de fluidos a través del medio poroso.

6. **Predicciones.** Luego de ajustar, de manera satisfactoria, las producciones históricas de los fluidos del campo, se da vía libre a la realización de corridas de predicción hasta una fecha determinada por el usuario que le permita visualizar el comportamiento futuro de la producción y el depletamiento de la presión para tomar decisiones técnico - económicas que beneficien el futuro desarrollo del proyecto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Se generó el modelo de simulación numérico de la Formación Caballos cuyas unidades son U4, U3, U2 y U1, con base en la interpretación sísmica del modelo ACAE – 3D del año 2003 y la re - interpretación petrofísica, generándose un modelo de 17649 celdas. El modelo resultante presentó aspectos positivos con respecto a la rapidez de la corrida y a la buena similitud con la estructura del yacimiento, pero presentó desventajas en el modelamiento de facies y, por ende, en el flujo de los fluidos.
- Se generó un modelo de simulación analítico para la Formación Villeta con base en la nueva interpretación del modelo sísmico ACAE – 3D, para lo cual se trabajó una grilla de 11550 celdas y se obtuvo un OOIP en P50 de 20'901.000 STB. Debido a la incertidumbre que se posee sobre este modelo, no fue posible llegar a un modelo numérico; por lo cual, el valor de OOIP presentado corresponde al valor obtenido en la parte media de la formación ya que no se tiene conocimiento de la ubicación del contacto agua – aceite en la formación; es por esto que fue necesario ubicar el contacto en la partes superior, media e inferior del yacimiento y obtener los correspondientes valores de OOIP; dichos valores poseen la misma probabilidad de ser el valor real. En la tabla 1 se presentan estos resultados.
- Se pudo concluir que a partir del cálculo del influjo de agua mediante el método de Van Everdingen y Hurst, el yacimiento de la Formación Caballos presenta un excelente soporte



Fuente: ECOPEPETROL S.A. 2009.

Figura 1. Conexiones de los Tres Acuíferos en el Modelo de la Formación Caballos.

**Tabla 1.** Resultados de aceite original In Situ para la arena T de la formación villeta a las diferentes profundidades del contacto agua - aceite.

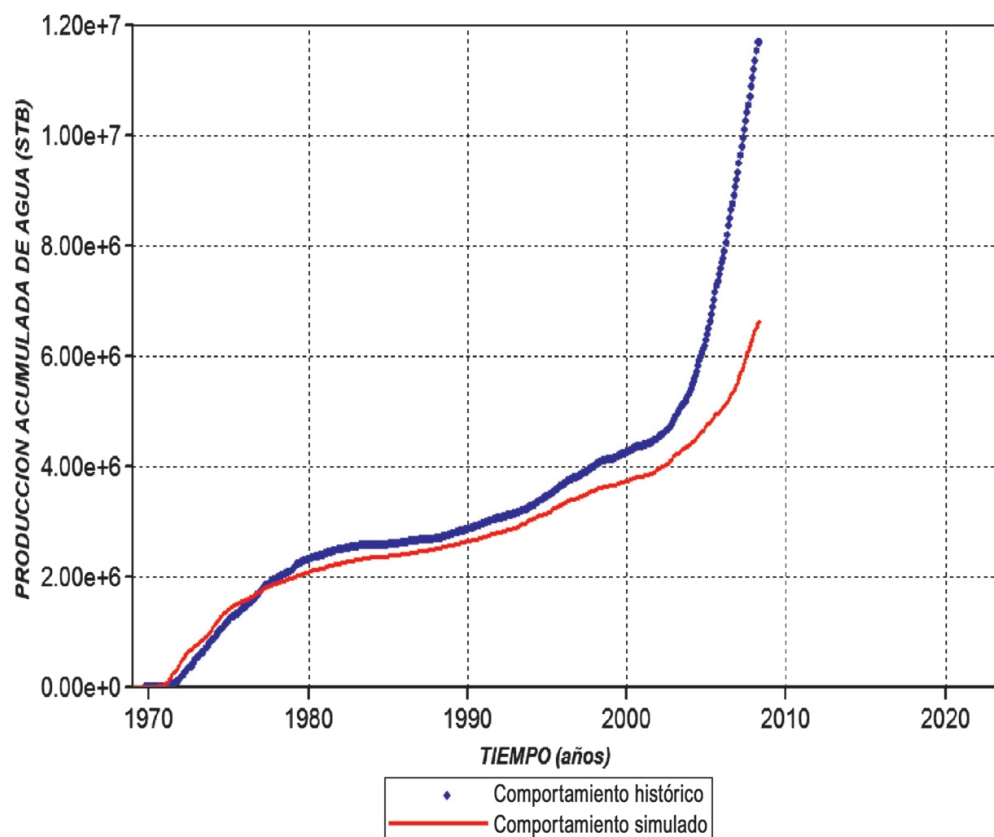
Profundidad del contacto (pies)	ubicación del contacto	OOIP (MSTB)	OGIP (Mscf)	OWIP (MSTB)	Volumen poroso de hidrocarburos (MRB)
9415	Al tope de la última capa	33.527	6336.6	30.226	38.789
9350,35	En la mitad del yacimiento	20.901	3950.3	44.306	24.188
9309,8	Al tope de la segunda capa	7.7158	1458.3	59.015	8.9317

Fuente: los autores.

de presión generado por los acuíferos que posee (9'756.276 RB de agua para enero de 2008), siendo el más predominante el acuífero de fondo. En la figura 1 se presenta la ubicación de los acuíferos en el modelo de la Formación Caballos.

- El OOIP de la simulación ajustó de manera satisfactoria con el calculado por el método volumétrico en el año 2002 dando un resultado 86'589.000 STB para todo el modelo, lo cual significa que el modelo pudo ajustar de manera satisfactoria las reservas del campo y se evitó, de esta manera, producciones desproporcionadas referentes a los valores históricos.
- El OOIP arrojado por el método de Balance de materiales no arrojó el resultado esperado; se presentó una desviación estándar en la Unidad U3 de 7.07% y en la Unidad U2 de 17.67% por factores descritos a continuación:
- No existen curvas de presión estática para cada una de las unidades del campo, por lo cual fue necesario trabajar con la curva de presión estática de la Unidad U3 que era la única disponible; esta decisión generó incertidumbre en los cálculos para las demás unidades.
- No existen datos concretos del acuífero que posee el Campo Loro; por lo cual no fue posible trabajar con el método de Fetcovich que es más acertado que el método utilizado en este trabajo (Van Everdingen and Hurst).
- Una de las limitantes del método de balance de materiales es que la producción debe ser constante a lo largo del tiempo, por lo cual el acumulado siempre debe aumentar y, como en el campo existieron intervalos en los cuales estuvieron cerradas las unidades por diversos motivos, no se cumple dicho principio, lo que produce incertidumbre en los resultados.
- En el método de Van Everdingen y Hurst, especifican dos geometrías del acuífero (radial y lineal), lo cual en la realidad no se cumple del todo. En este proyecto se decidió trabajar con acuífero radial, lo cual ayudó al cálculo pero mantiene la incertidumbre.
- Para los datos petrofísicos utilizados en el cálculo fue necesario trabajar con el pozo más bajo estructuralmente, el cual es Loro 6; el problema consiste en que se generalizaron sus propiedades para toda la caracterización del acuífero.

- Los valores de  $b_o$  y  $b_g$  no fueron datos proporcionados por la empresa sino que fue necesario interpolar para obtener los valores de  $b_o$  y hacer una correlación para obtener los valores de  $b_g$ , estos métodos influyen en la incertidumbre de los resultados.
- No hay suficiente certeza en los valores de los volúmenes de gas producido en el campo.
- La producción acumulada de agua simulada tiene una alta incertidumbre pues no se pudo alcanzar el valor histórico real de 11'729.500 STB; se manejó una incertidumbre de 43.43%;

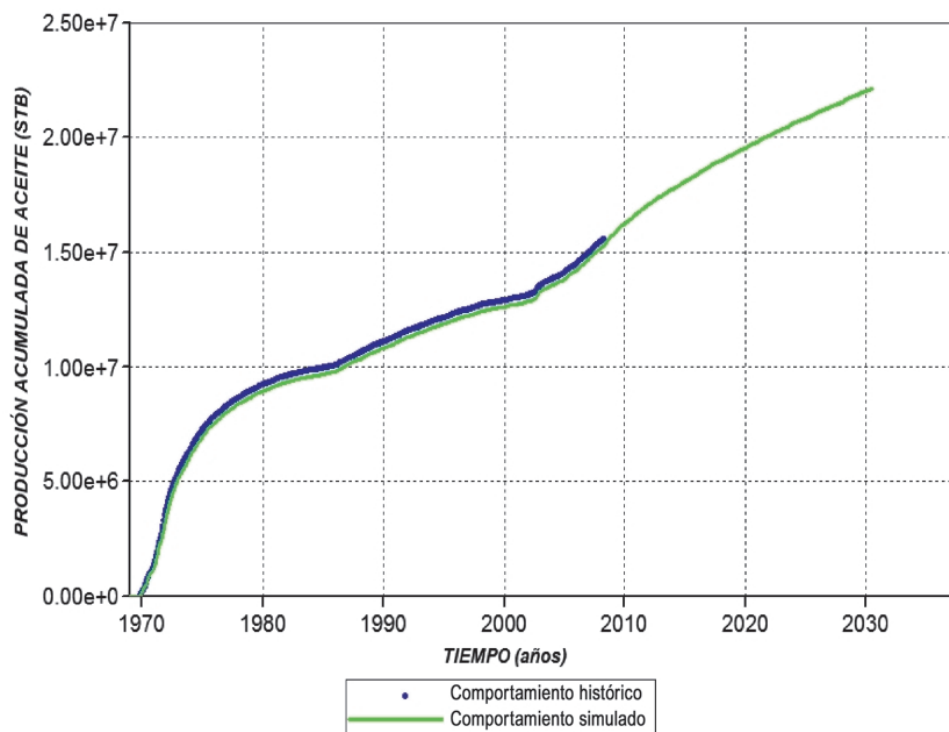


Fuente: los autores y ECOPEPETROLS. A.

**Figura 2.** Ajuste de la Producción Acumulada de Agua de la Formación Caballos.

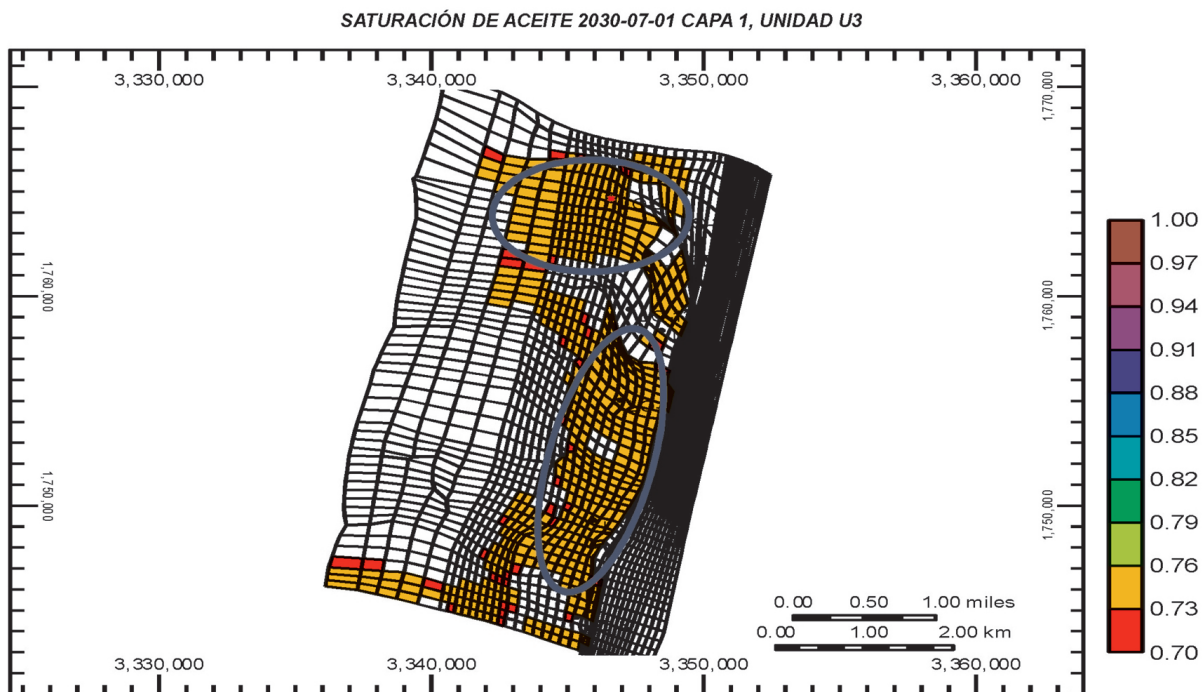
esto debido a que no fue posible ajustar los pozos Loro 5A y Loro 11, los cuales actúan a partir del año 2002 y producen altos cortes de agua. En la Figura 2 se presenta la grafica de producción acumulada de agua:

- La producción acumulada de aceite simulada arrojó resultados satisfactorios pues se alcanzó un valor de 15'294.000 STB; se manejó una incertidumbre de 4.67%; esto genera una alta confiabilidad en las predicciones de la producción de aceite y se puede ver en la Figura 3 que se muestra a continuación.



Fuente: los autores.

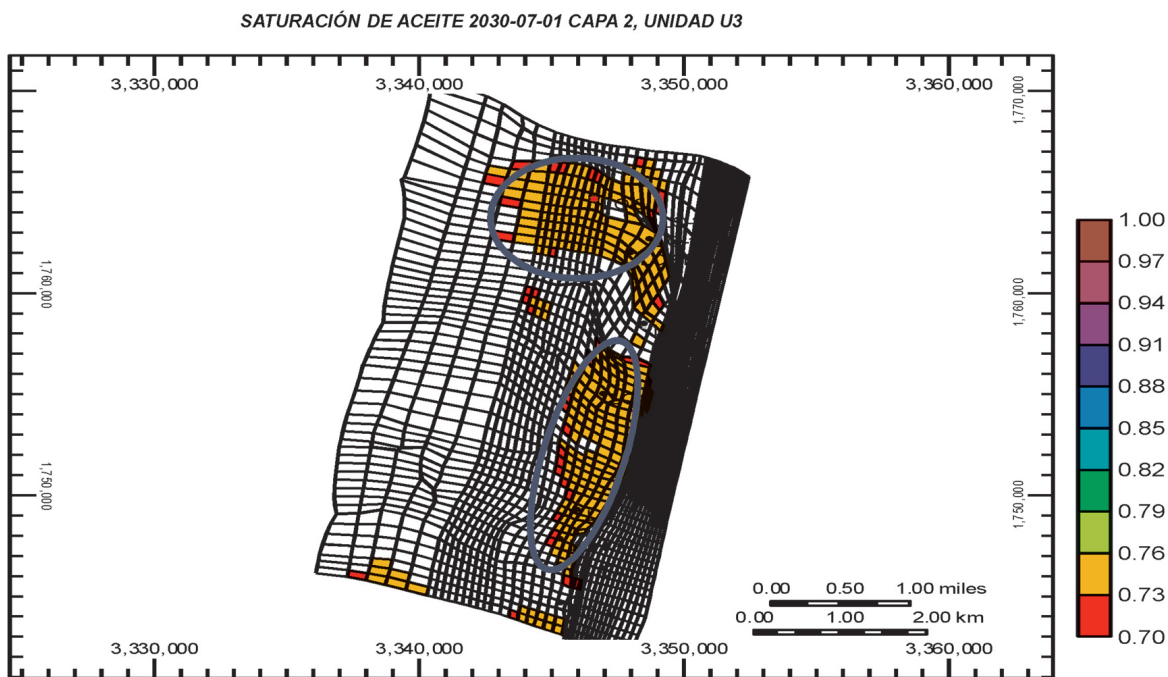
Figura 3. Pronóstico Simulado de la Producción Acumulada de Aceite de la Formación Caballos.



Fuente: los autores y C.M.G.

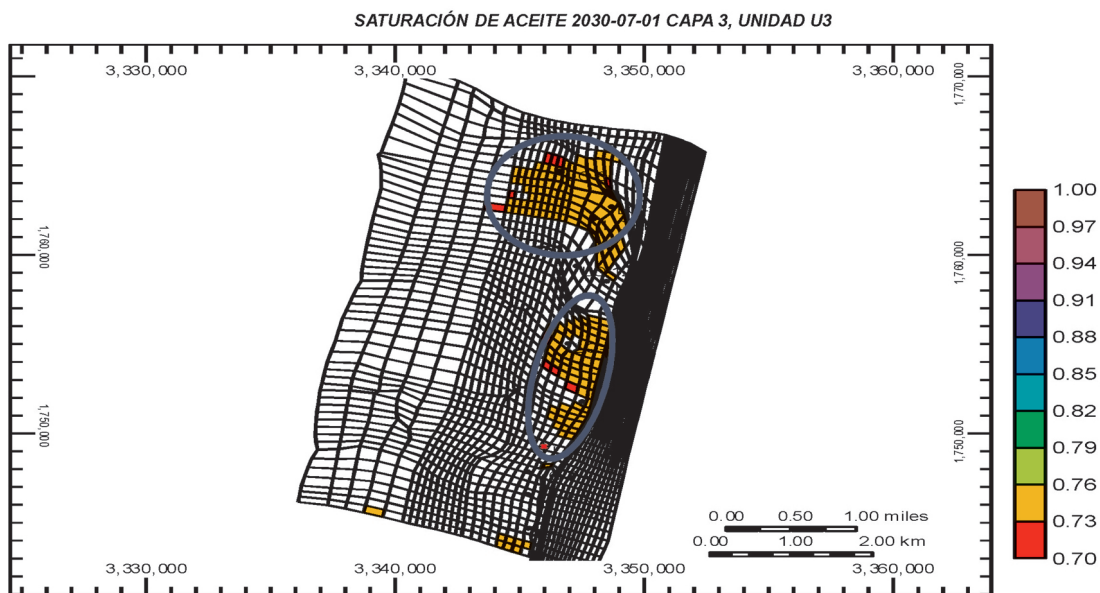
Figura 4. Distribución de Saturación de Aceite en la Primera Capa de la Unidad U3 para el año 2030.





Fuente: los autores y C.M.G.

**Figura 5.** Distribución de Saturación de Aceite en la Segunda Capa de la Unidad U3 para el año 2030.



Fuente: los autores y C.M.G.

**Figura 6.** Distribución de Saturación de Aceite en la Tercera Capa de la Unidad U3 para el año 2030.

- Para el modelo de la Formación Caballos se obtuvo un Factor de Recobro a Mayo de 2008 de 17.66% y luego de la corrida de predicción el Factor de Recobro a Julio de 2030 sería de 25.53%. Esto debido a que la Unidad U2 fue drenada en su totalidad y a que existen zonas en la Unidad U3 que podrían aumentar aun más el factor de recobro del campo. En las Figuras 4 a la 6 se presentan las posibles zonas potencialmente drenables de la Unidad U3.

## CONCLUSIONES

- Se analizaron las variables petrofísicas a través de la interpretación de los registros eléctricos de pozo y las dinámicas a través del análisis de flujo de fluidos con el comportamiento histórico del yacimiento, relacionadas con las formaciones Caballos y Villeta.
- Se realizó la actualización de los modelos estático y dinámico de los yacimientos del Campo Loro; el primero con la interpretación petrofísica y obtención del NTG, la porosidad efectiva y la permeabilidad absoluta y el segundo con la actualización de los datos de producción y la modificación de las curvas de permeabilidad relativa.
- Dados los pocos datos de presión estática obtenidos en la campo no se obtuvo una comparación justa con los resultados arrojados por el simulador.
- Se concluyó que el mecanismo de entrada de agua no es claro para algunos pozos, en especial para Loro 5A y Loro 11; lo anterior se reflejó en el ajuste de producción de agua a partir del año 2004 para Loro 5A y a partir del año 2002 para Loro 11.
- Luego de realizar la corrida de predicción se concluyó que al año 2030 la Unidad U2 ha sido eficientemente drenada y no posee reservas remanentes.
- Los prospectos para la unidad U3 arrojan la posible existencia de reservas sin drenar al año 2030 con una distribución de saturaciones de aceite promedio de 70% en la zona norte del campo, lo cual contribuye a la realización de nuevas campañas de perforación en esta zona.
- La grilla que se construyó para la Arena T de la Formación Villeta tiene una alta incertidumbre asociada a que no se cuenta con un histórico de producción y caracterización de facies del yacimiento; por lo tanto, el trabajo que se realizó para esta unidad no posee las suficientes garantías en los resultados arrojados.
- Durante la realización de este trabajo de grado se evidenció el buen mantenimiento de presión que ha tenido el Campo Loro a través del tiempo por causa del acuífero activo que posee dicho yacimiento; se pronostica para el año 2030 una presión estática de 3000 psi por encima de la presión del punto de burbuja.
- A la terminación de este proyecto se evidenció la necesidad de realizar un análisis de daño de formación pozo a pozo ya que esto influye, de manera significativa, en el ajuste histórico del campo.
- El OOIP de la Unidad U1 no se obtiene de manera satisfactoria por el método de Balance de Materiales, ya que dicha unidad presenta una alta saturación de agua distribuida aleatoriamente en el yacimiento.

## RECOMENDACIONES

- Utilizar otros métodos de interpolación diferentes al utilizado en el desarrollo de este trabajo de grado para la creación de los mapas que poblarán la grilla de simulación y, de esta manera, lograr la disminución en la incertidumbre de los resultados presentados.
- Calcular el influjo y tamaño del acuífero del yacimiento por otro método distinto al utilizado, en el presente trabajo de grado, para lograr una verificación de los resultados obtenidos a partir del método de Van Everdingen y Hurst.
- Realizar el cálculo de las reservas del campo mediante el método de curvas de declinación para tener otro patrón de comparación con los resultados arrojados por los otros dos métodos
- Modelar litofacies en los modelos de la Formación Caballos y en la Arena T de la Formación Villeta, para poder lograr un mejor ajuste de la producción de agua en la Formación Caballos y una disminución de la incertidumbre en el modelo de la Arena t de la Formación Villeta; ya que utilizando esta herramienta se puede lograr una mejor interpretación del comportamiento del agua dentro de la Formación Caballos y, por otra parte, se logra representar las arcillas incrustadas dentro de cada unidad; mientras que para el modelo de la Formación Villeta se puede lograr una mejor representación de las calizas que posee ésta.
- Mejorar el modelo de simulación de la Arena T de la Formación Villeta para disminuir el grado de incertidumbre de los resultados obtenidos en el presente estudio.
- Generar nuevos prospectos de producción para la Formación Caballos a partir de las zonas sin drenar que se recomendaron en este trabajo de grado.
- Incluir en el presente modelo de la formación caballos, de forma más detallada, todos los trabajos de workover realizados en los diferentes pozos así como los valores actuales de Skin de cada uno de ellos.

