

# **SIMULACION GEOMECÁNICA APLICADO AL ESTUDIO DE LA COMPACTACIÓN**

Russ Quintero, Stéphanie Klarica & Florez Julio  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes  
Mérida, Venezuela

## **Resumen**

El estudio de la compactación como mecanismo de recuperación de fluidos tiene gran importancia en la industria petrolera para la estimación de los volúmenes probables de estos fluidos. Se realiza aquí un estudio por medio de simulaciones geomecánicas, con el propósito de establecer cómo varían la compactación y el hundimiento en la superficie de los campos petroleros al cambiar los parámetros asociados a los modelos constitutivos: un modelo elástico lineal para las lutitas y el basamento, y un modelo elastoplástico Cam-Clay par las arenas. Las simulaciones se realizan utilizando el programa ABAQUS basado en el método de los elementos finitos que permite efectuar análisis acoplados de esfuerzos y deformaciones con flujo en medios porosos. Se presenta en este trabajo un conjunto de simulaciones donde se modifica la rigidez del material suprayacente. Del conjunto de resultados, se analiza su influencia sobre los cambios de volúmenes porosos del yacimiento y los asentamientos. Se observó que los materiales suprayacentes más rígidos, debido al efecto arco, impiden que se desarrollen mayores deformaciones, especialmente, deformaciones plásticas. Por lo tanto, disminuye la compactación del yacimiento. Además, los hundimientos en superficie, para estos materiales, son menores que estos obtenidos para materiales más blandos.

## **Introducción**

En diferentes regiones, a nivel mundial, en donde se realizan extracciones de fluidos como petróleo, agua o gas, se ha hecho presente un fenómeno caracterizado por el hundimiento de la superficie del terreno, causado por la compactación de yacimientos originada por el proceso de extracción del fluido, este fenómeno es conocido como subsidencia. En Venezuela apareció en Lagunillas, estado Zulia, luego de iniciada la actividad petrolera y según reportes de prensa, el hundimiento por subsidencia en esta zona calculado hasta ahora, es de 5.30 metros; en los sectores conocidos como Tía Juana y Bachaquero éste ha sido estimado en 4.0 metros. Este fenómeno ha sido observado, además, en ciudades petroleras como Long Beach (USA) y Groningenn (Holanda), (Faria, N., 2001).

El estudio y la estimación adecuada de la compactación a través de simulaciones geomecánicas permiten establecer medidas que limiten los daños que puedan ser ocasionados por el fenómeno derivado de la compactación como lo es la subsidencia. Sin embargo, la compactación presenta aspectos positivos, las cantidades de volúmenes de petróleo recuperadas están relacionadas al grado de compactación logrado durante el proceso de extracción. Mayor compactación del yacimiento está relacionada a mayores volúmenes de recobro de fluido.

En este sentido, se realiza un estudio con el propósito de determinar la influencia que tienen el módulo de elasticidad de las lutitas suprayacentes sobre la compactación de las arenas del yacimiento, cuyo material fue caracterizado por medio del modelo elastoplástico Cam – Clay. Se evalúa, también, la incidencia de esta variable sobre los hundimientos en superficie. Para ello se parte de una geometría que representa una idealización bidimensional del sistema yacimiento y su entorno con un conjunto de propiedades mecánicas de las rocas y propiedades de los fluidos que conforman el sistema. Con esta geometría, se realizan las simulaciones empleando para ello el programa ABAQUS basado en el método de los elementos finitos que permite el análisis acoplado esfuerzos y deformaciones con flujo en medios porosos.

### **Marco teórico: Modelo Cam - Clay**

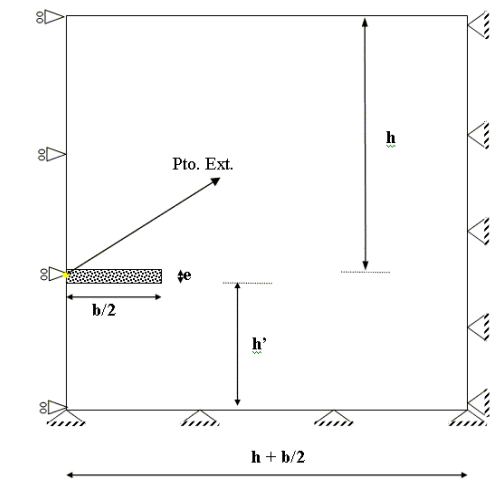
Para describir el comportamiento de los materiales tanto suprayacente como el ubicado por debajo del yacimiento, se utiliza un modelo elástico lineal y el comportamiento del material del yacimiento es descrito por medio de un modelo elastoplástico. La parte elástica obedece a una relación no lineal y la parte plástica es representada mediante el modelo Cam-Clay, modelo creado con la intención de simular el comportamiento de materiales sin cohesión (ABAQUS, 1998). A continuación se resumen las características más resaltantes de este modelo:

- El modelo describe la existencia de una región en la cual la respuesta del material es elástico, más allá de ésta, una parte de la deformación no puede ser recuperada por lo tanto es idealizada como plástica.
- El comportamiento de fluencia depende de la presión hidrostática. La línea que define el estado crítico separa dos zonas del comportamiento: el lado “seco” en el cual el material se ablanda, es decir los granos del material se separan y el lado “húmedo” en donde se produce un endurecimiento del material.
- El endurecimiento o ablandamiento del material es función de la deformación volumétrica.
- El comportamiento inelástico está acompañado generalmente por cambios de volumen. En el lado “seco” el material se dilata, mientras que en el lado “húmedo” éste se compacta. Sobre la línea del estado crítico el material fluye con esfuerzos cortantes constantes sin que haya cambio de volumen.
- El modelo considera que el material no es cohesivo.

El modelo Cam – Clay presenta ciertas limitaciones para describir, adecuadamente, el comportamiento de algunos materiales cuando estos se encuentran sometidos a intervalos más amplios de cargas (Charlez, 1997; Parra, 1999). Otra limitación tiene que ver con la línea que define el estado crítico, la cual tiene una expresión que depende de la fricción del material, y es que dicha fricción disminuye cuando se producen incrementos en los esfuerzos principales (Charlez, 1997). Esto también le ocurre a la pendiente de la línea del estado crítico ( $M$ ), ya que  $M$  varía con la presión de confinamiento del material y esta variación no está reflejada en el modelo.

## Metodología

Se parte de una idealización de un canal de arenas productoras que serán representadas por un sistema yacimiento y su entorno. La geometría considerada es bidimensional, y se aprovecha la simetría del sistema para reducir el tamaño de la malla. La parte yacimiento es modelada usando un material poroelastoplástico, con un solo punto de extracción ubicado en el centro del yacimiento. El entorno es modelado usando un material poroelástico, se colocaron en el eje de simetría apoyos que permiten los desplazamientos verticales. En la base y a la derecha del yacimiento, a una distancia  $h$ , se restringió ambos desplazamientos, considerando que en estas regiones los desplazamientos causados por el proceso de extracción son nulos. La geometría arriba descrita se indica en la Figura 1, la Tabla 1 describe el conjunto de valores que la definen.



$b =$	548.64 m	1800 pies
$e =$	30.48 m	100 pies
$h =$	914.40 m	3000 pies
$h' =$	548.64 m	1800 pies

**Figura 1:** Modelo general que describe el sistema yacimiento y su entorno.

**Tabla 1:** Geometría del modelo utilizado.

## Propiedades mecánicas de los materiales

Para caracterizar el comportamiento del material del entorno, se utilizó propiedades poroelásticas y propiedades poroelastoplásticas para definir el comportamiento del yacimiento. El primero corresponde a los valores de elasticidad  $E$  y la relación de Poisson  $\nu$ . En el modelo de referencia se asigna un valor de  $E = 1.0$  GPa. y  $\nu = 0.20$  para el material por encima y adyacente al yacimiento de esta manera se modela una roca de un solo estrato que podría corresponder a unas lutitas;  $E = 30$  GPa. y  $\nu = 0.15$  para el material que soporta el yacimiento formado también por un solo estrato rígido, estos valores correspondientes a un basamento ígneo-metamórfico. En el yacimiento constituido por unas arenas, para definir la parte elástica, se tiene el módulo volumétrico logarítmico  $\kappa$  y la relación de Poisson  $\nu$ . A estos valores se agrega, para definir el comportamiento plástico de las arenas no consolidadas o no cementadas, los correspondientes al modelo de plasticidad Cam-Clay en medios porosos, estos son: el módulo volumétrico plástico  $\lambda$ , la pendiente de la línea que define el estado crítico  $M$ , y el ángulo de fricción del material  $\phi$ . El tamaño inicial de la superficie de cedencia  $a_0$ , dado en unidades de fuerza por unidad de área representa la

fuerza de endurecimiento por deformación del material y corresponde a la mitad del valor de la presión de consolidación de este material (Charlez, 1997).

Propiedades elásticas		Propiedades plásticas	
$\nu$	0.16	$\lambda$	0.14
$\kappa$	0.021	$\phi$	37°
		$a_0$	5.87 MPa
		M	1.506

**Tabla 2:** Propiedades elásticas y plásticas del material del yacimiento.

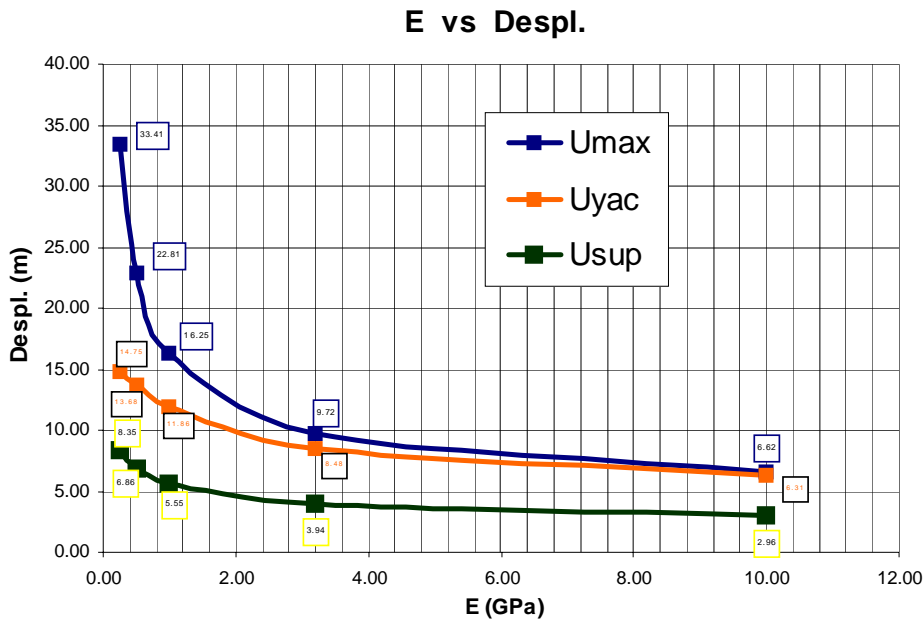
Las rocas son modeladas considerando que sus propiedades son homogéneas en todo el medio. El material por encima del yacimiento y el material por debajo de éste tienen una relación de vacíos inicial  $e_0 = 0.1$ , permeabilidad  $k = 4.86 \times 10^{-8}$  m/día., peso específico de los granos  $\gamma_s = 19709.17$  N/m<sup>3</sup> y está saturado por un fluido cuyo peso específico es  $\gamma_w = 9810$  N/m<sup>3</sup>. Se considera que los granos son incompresibles, al fluido se asigna un módulo de compresibilidad  $k_f = 1.0$  GPa. En el yacimiento, la relación de vacíos inicial es  $e_0 = 0.4285$ , la cual corresponde a una porosidad de 0.3, la permeabilidad  $k = 4.86 \times 10^{-3}$  m/día, los pesos específicos de los granos y del fluido son respectivamente  $\gamma_s = 17616.11$  N/m<sup>3</sup> y  $\gamma_w = 9623.61$  N/m<sup>3</sup>. El módulo de compresibilidad del fluido en el yacimiento es  $k_f = 1.38$  GPa. Se hace notar que en este estudio se considera que los fluidos que saturan los suelos son monofásicos y las compresibilidades de éstos son constantes, por lo tanto, queda fuera del alcance de este trabajo el uso de fluidos con características diferentes a las presentadas. Para todo el sistema, se asigna la relación entre el esfuerzo horizontal y el esfuerzo vertical igual a 0.80.

## Resultados

El material suprayacente fue idealizado considerando un comportamiento elástico lineal y se evalúa la incidencia que tiene la rigidez de este material sobre la compactación en el yacimiento, a través del cambio de volumen poroso, y sobre el asentamiento en superficie derivado por el proceso de extracción del fluido. En esta parte se varió el módulo de elasticidad y se mantuvo fijo los demás parámetros establecidos en el modelo de referencia. Los resultados se muestran en la Tabla 3. Se determinan curvas de desplazamientos verticales (Figura 2) en función del módulo de elasticidad para puntos significativos en el sistema, a saber: un punto en la superficie que coincide con el eje de simetría, en la parte superior del yacimiento donde se intercepta con el eje de simetría y el punto donde aparece el máximo desplazamiento vertical que, en general, fue localizado por encima del yacimiento a una distancia aproximada de 30 metros.

E (GPa)	U <sub>max</sub> (cm.)	U <sub>max_yac</sub> (cm.)	U <sub>max_sup</sub> (cm.)	Vol. Poroso (m <sup>3</sup> /m)
10.00	6.62	6.31	2.96	18.29
3.20	9.72	8.48	3.94	22.99
1.00	16.25	11.86	5.55	30.91
0.50	22.81	13.68	6.86	36.78
0.25	33.41	14.75	8.35	41.71

**Tabla 3:** Resultados de desplazamientos máximos en puntos del modelo ubicados la superficie que coincide con el eje de simetría, en la parte superior del yacimiento donde se intercepta con el eje de simetría y el punto donde aparece el máximo desplazamiento vertical. Volúmenes porosos.

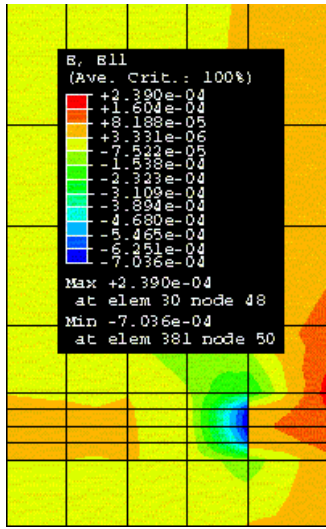


**Figura 2:** Curvas de desplazamientos máximos en función del modulo de elasticidad del material suprayacente.

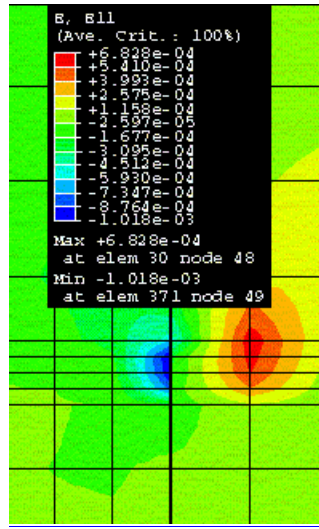
Los resultados obtenidos indican que a medida que la rigidez del material suprayacente aumenta, decrecen los valores de desplazamientos en el modelo. Al comparar los máximos desplazamientos para los módulos de elasticidad desde 0.25 GPa hasta 10 GPa, se puede apreciar que estos decrecen a casi el 20 %. Esta tendencia es menos pronunciada para los desplazamientos en la parte superior del yacimiento y en la superficie del modelo cuyo descenso llegan al 42 y 35 % respectivamente del desplazamiento correspondiente al valor de  $E = 10$  GPa. Se observa que esta caída es más fuerte para los primeros valores de  $E$  (entre 0.25 y 3 GPa), pero en la medida que el material se hace más rígido los resultados muestran una tendencia asintótica. En cuanto al cambio de volumen poroso, éste presenta una tendencia similar a la de los desplazamientos. Para el valor de  $E$  más bajo, el cambio de volumen poroso fue de  $41.71 \text{ m}^3/\text{m}$  disminuyendo a  $18.29 \text{ m}^3/\text{m}$  para el modulo de elasticidad más alto. Esto representa una reducción de aproximadamente el 56.2%, la mayor parte de ella se da para valores de  $E$  menores a 3 GPa.

Cuando se tienen materiales más rígidos adyacentes al yacimiento, estos causan disminuciones significativas en el cambio de volumen poroso. Esta disminución es debida a la baja compactación que se produce en el suelo así como a la disminución de la deformación lateral del yacimiento inducida por el empuje del material ubicado a los lados del yacimiento como lo indica las imágenes de deformaciones en la Figura 3.

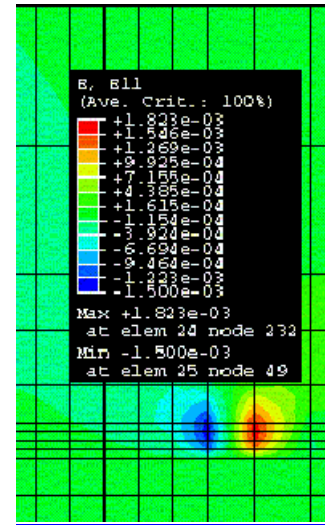
Cuando se uso el modulo de elasticidad de 10 GPa, no ocurrió incremento del tamaño de la superficie de fluencia para ningún punto dentro del yacimiento a diferencia de lo observado para  $E = 0.25$  GPa. Los materiales suprayacentes más rígidos, debido al efecto arco, impiden que se desarrollen mayores deformaciones, especialmente, deformaciones plásticas. Los materiales blandos por encima del yacimiento producen ellos incrementos en la deformación plástica dentro del yacimiento lo cual conlleva al incremento del cambio de volumen poroso.



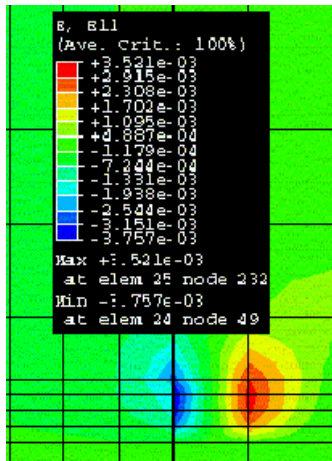
a)  $E = 10$



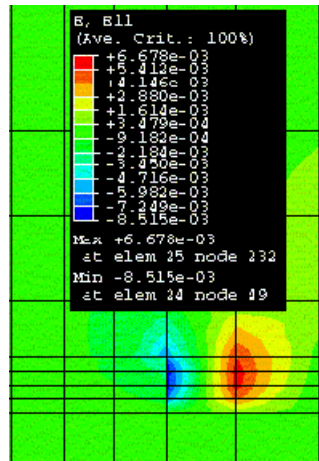
b)  $E =$



c)  $E = 1.00$



d)  $E = 0.50$



e)  $E = 0.25$

**Figura 3:** Contornos de deformaciones obtenidos para los distintos valores de modulo de elasticidad. La deformación horizontal se incrementa con la disminución de E.

## Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones derivadas de las simulaciones realizadas para analizar la incidencia del módulo de elasticidad del medio suprayacente sobre los asentamientos en superficie y sobre la compactación en el yacimiento, cuyo comportamiento fue caracterizado por medio de un modelo elastoplástico Cam-Clay.

1. Los resultados de desplazamientos obtenidos para los distintos valores de módulo de elasticidad del material suprayacente indican que a medida que este parámetro aumenta la subsidencia causada por el proceso de extracción del fluido disminuye.
2. A partir de valores de módulos de elasticidad mayores a 3 GPa, los resultados de desplazamientos en superficie muestran una tendencia asintótica lo cual indica que la subsidencia para estos valores de E se hace constante.
3. El cambio de volumen poroso también disminuye cuando aumenta el valor del módulo de elasticidad debido a la baja compactación que se produce en la capa ubicada por encima del yacimiento así como a la disminución de la deformación del yacimiento inducida por el empuje del material ubicado a los lados de éste.
4. El máximo desplazamiento se ubica por encima del yacimiento a una distancia aproximada de 30 metros. Por lo tanto, los procesos que permiten medir la subsidencia deberían colocar las balas o los marcadores radioactivos dentro y por encima del yacimiento.
5. Los materiales por encima del yacimiento con módulos de elasticidad bajo producen aumentos en la deformación plástica dentro del yacimiento, esto hace que se incremente los valores de cambio del volumen poroso.
6. El desplazamiento máximo obtenido considerando el yacimiento elastoplástico es un 18 % mayor que el desplazamiento máximo cuando se considero el comportamiento del yacimiento completamente elástico. El cambio de volumen poroso en el primer caso fue un 20 % mayor al obtenido en el segundo caso.

## Agradecimientos

Este estudio, financiado por PDVSA Intevep, es el resultado de un trabajo conjunto entre la Universidad Los Andes, Mérida (Russ Quintero, Julio Florez y Stéphanie Klarica) y PDVSA-Intevep, Los Teques.

## Referencias

- ABAQUS Theory Manual, version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorenson, INC., Pawtucket (RI), 1998.
- Charlez, Philippe A. Rock Mechanics, Vol. 2, Petroleum Applications, Paris, Editions Technip, 1997, pp. 661.
- Faria, Nancy, "El Muro de contención llegó a sus 75 años", Diario Panorama, 28-10-2001, p. 1.5 –1.7. Maracaibo, Venezuela.
- Parra R., José, Mechanical Characterization and Compaction Studies on Cerro Negro Unconsolidated Sands, Informe INTEVEP, S.A, Los Teques, 1999.
- Wood, David M., Soil Behaviour and critical State Soil Mechanics, 1° ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1990, pp.462.