

CMP2018\_GC40

### **Influencia de la anisotropía en la determinación de los esfuerzos horizontales en rocas arcillas**

José Adalberto Morquecho Robles (Universidad Nacional Autónoma de México),  
David Velázquez Cruz (Instituto Mexicano del Petróleo), Gustavo Espinosa  
Castañeda (Instituto Mexicano del Petróleo).

#### **Resumen**

La inestabilidad mecánica de pozos es uno de los mayores problemas que se tienen durante la perforación ya que incrementan considerablemente los costos de la operación. Es esencial entender el comportamiento mecánico de las formaciones a perforar con el fin de reducir al máximo los problemas como atrapamiento de tuberías, colapsos o resistencias en el agujero, más aún tratándose de formaciones lutíticas. Las lutitas se caracterizan por la variación de sus propiedades mecánicas en todo su espesor teniendo un plano perpendicular a su espesor donde sus propiedades no varían, a esto se le conoce como medio isótropo transversal vertical. En el presente trabajo se da a conocer el desarrollo de una metodología que involucra la anisotropía del material y las deformaciones horizontales presentes en el pozo, para determinar y analizar la magnitud de los esfuerzos horizontales a través de modelos físico-matemáticos derivados de la teoría de la ley de Hooke. La metodología desarrollada utiliza información básica de registros lo que resulta práctico para utilizarlo en la predicción de los esfuerzos horizontales con el fin de establecer estrategias en la estabilidad de pozos para una perforación exitosa.

#### **Introducción**

La determinación de los esfuerzos horizontales es parte fundamental para un análisis geomecánico, sobre todo para estudios relacionados a la estabilidad mecánica de pozos. La inestabilidad de pozos es uno de los principales problemas con los que se enfrenta en la perforación de pozos, ya que incrementan considerablemente los



costos de la operación e incluso puede ocasionar hasta el abandono del pozo. Estimaciones muestran que los problemas como atrapamiento de tubería y resistencia en el agujero, asociados a la inestabilidad mecánica del pozo, provocan aproximadamente el 40% de todo el tiempo de inactividad de perforación (Gala, 2010).

Diversos autores como Chenevert y Gatlin (1964), Zhang (2005), Frydman (2010) y Franquet et al. (2012) mencionan que en la mayoría de los análisis de estabilidad de pozos la roca es modelada como un medio isótropo, aún inclusive cuando en las mediciones acústicas en muestras y en datos de registros de pozo muestre una gran diferencia entre los valores medidos en las direcciones vertical y horizontal (Franquet et al., 2012). Consideran al mismo tiempo que los esfuerzos horizontales son iguales y que no existen deformaciones horizontales. Por consiguiente, los modelos generan errores en la predicción. La mayoría de las rocas sedimentarias, especialmente las lutitas, son anisótropas debido a su estructura sus propiedades varían bastante en sus diferentes direcciones (Ostadhassan, 2012). Las lutitas exhiben anisotropía en una sola dirección, debido a que las capas de estratificación tienen una estructura laminar y sus propiedades mecánicas son diferentes a partir del eje perpendicular al plano de estratificación, dándole el carácter de material transversalmente isotrópico (Zhang, 2005; Frydman, 2010).

Los modelos más simples asumen una relación lineal entre la fuerza aplicada y su deformación correspondiente, a esto se le conoce como elasticidad lineal. Bajo ciertas condiciones, el comportamiento mecánico de las rocas sigue una suposición elástica lineal. La teoría de la elasticidad lineal sigue la ley de Hooke, que relaciona el esfuerzo con la deformación, es decir, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado (Jaeger et al., 2007).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \dots\dots\dots (1)$$

La constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo y la deformación depende principalmente de la constitutividad del material, es decir, depende de la variación de las propiedades en las diferentes direcciones en que son medidas.

Por otra parte, existen diversas pruebas que se utilizan comúnmente para calibrar los esfuerzos horizontales. Una prueba directa para determinar la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo es por medio de las pruebas de goteo. Las pruebas de goteo son pruebas de presión que se realizan durante la perforación y se realizan después de haber cementado la tubería de revestimiento. El valor de dicha prueba es considerado igual al esfuerzo horizontal mínimo medido a una cierta profundidad, por tanto, decimos que se determina la magnitud del esfuerzo de manera puntual y podemos calibrar el perfil de esfuerzos calculado (López et al., 2011; Moronkeji, 2014).

En el presente trabajo se evalúa la influencia que tiene la anisotropía de formaciones arcillosas en la determinación de los esfuerzos horizontales. Desarrollando una metodología que involucra la anisotropía del material y las deformaciones horizontales en la predicción de los esfuerzos horizontales a través de modelos físico-matemáticos derivados de la teoría de la ley de Hooke.

### **Metodología para determinar los esfuerzos horizontales**

En este trabajo se presenta la metodología para determinar los esfuerzos horizontales considerando la influencia de la anisotropía y las deformaciones horizontales. La figura 1 muestra el flujo de trabajo para determinar los esfuerzos horizontales asumiendo la anisotropía, donde ya no solo se determinan dos constantes elásticas, sino que ahora depende del tipo de simetría. También, para determinar con mayor precisión la magnitud de los esfuerzos horizontales, se deben tomar en cuenta las deformaciones horizontales.

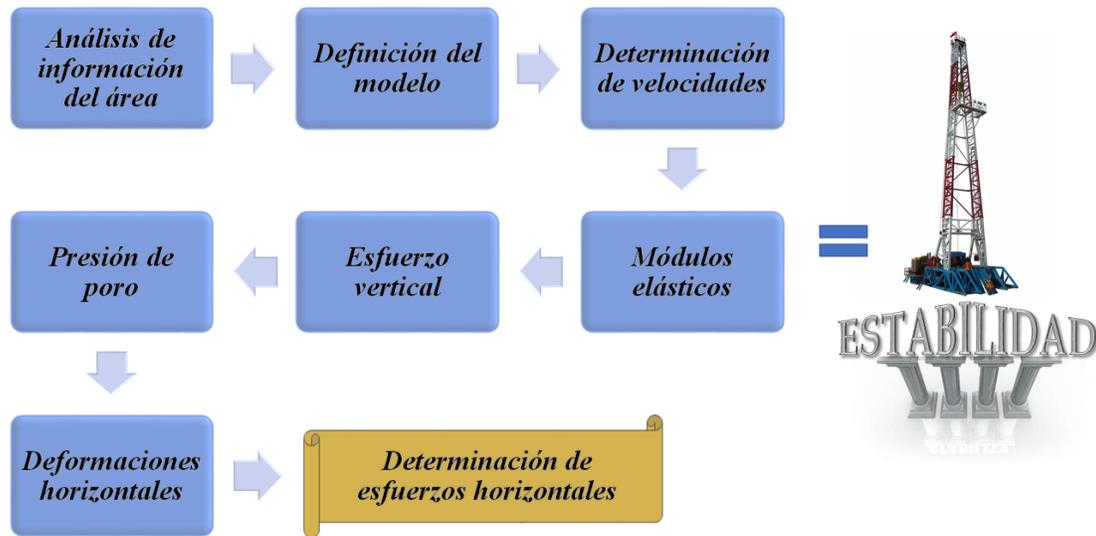


Figura 1. Metodología para determinar esfuerzos horizontales.

### Análisis de la información

El primer paso para determinar los esfuerzos horizontales es identificar el área en estudio y analizar la información disponible. Es importante contar con registros sísmicos dipolares para correlacionar las constantes medidas en el laboratorio, sin embargo, estos registros son costosos y en pocas ocasiones se llegan a utilizar. Por lo que en esta metodología se desarrollaron y calibraron modelos empíricos para obtener información que no puede ser obtenida directamente de los registros.

### Definición del modelo

Es esencial la obtención de muestras de la formación que se desea estudiar, ya que, al realizar pruebas directas a las muestras, aclaramos el comportamiento del medio y, por ende, la anisotropía que presenta. Lo adecuado es obtener muestras cúbicas para evaluar y considerar las tres direcciones de los esfuerzos in-situ correctamente. Es recomendable someterlas a una prueba true triaxial para representar los tres esfuerzos principales a sus condiciones originales y obtener los módulos elásticos,

sin embargo, en algunos tipos de roca es difícil realizar este tipo de pruebas. Otra manera de obtener los módulos es a partir de mediciones ultrasónicas en las diferentes caras del cubo para obtener las respectivas velocidades y posteriormente calcular los módulos utilizando las siguientes expresiones:

$$C_{11} = \rho V_{p-x}^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{22} = \rho V_{p-y}^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{33} = \rho V_{p-z}^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{44} = \rho V_{s-yz}^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{55} = \rho V_{s-xz}^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$C_{66} = \rho V_{s-xy}^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$C_{12} = \sqrt{(2\rho V_{p-xy}^2 - C_{66} - \frac{C_{22}}{2} - \frac{C_{11}}{2})^2 - \frac{1}{4}(C_{22} - C_{11})^2} - C_{66} \dots\dots (8)$$

$$C_{13} = \sqrt{(2\rho V_{p-xz}^2 - C_{55} - \frac{C_{11}}{2} - \frac{C_{33}}{2})^2 - \frac{1}{4}(C_{11} - C_{33})^2} - C_{55} \dots\dots (9)$$

$$C_{12} = \sqrt{(2\rho V_{p-yz}^2 - C_{44} - \frac{C_{22}}{2} - \frac{C_{33}}{2})^2 - \frac{1}{4}(C_{22} - C_{33})^2} - C_{44} \dots\dots (10)$$

### Determinación de velocidades

A partir de los registros de pozo básicos se determina la velocidad compresional a partir del recíproco del tiempo de tránsito compresional obtenido de registros de pozo.

$$V_p [m/s] = 304800 * \left( \frac{1}{DTC [ft/s]} \right) \dots\dots\dots (11)$$

Como se mencionó anteriormente, los registros sínicos son muy costosos y en pocas ocasiones son utilizados, por lo tanto, para determinar la velocidad de corte

se utilizan modelos empíricos. Los modelos más utilizados son los de Greenberg and Castagna (1992), no obstante, estos modelos se obtuvieron a partir de formaciones limpias y en muchas ocasiones las formaciones varían en el contenido de arcilla por lo que en dichos modelos puede variar el nivel de incertidumbre y puede ocasionar malos pronósticos en la predicción de la velocidad de corte.

Por tal motivo se determinó un modelo el cual involucra el contenido de arcilla y la velocidad compresional. El primer paso fue realizar un análisis estadístico de los datos para poder definir patrones de comportamiento y comprobar la existencia de linealidad, homocedasticidad, independencia y normalidad, para posteriormente realizar la regresión múltiple.

En la regresión lineal múltiple utilizamos más de una variable explicativa; esto nos va a ofrecer la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas. En definitiva, y al igual que en regresión lineal simple, vamos a considerar que los valores de la variable dependiente  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  han sido generados por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas y un término aleatorio (ecuación 12).

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n \dots \dots \dots (12)$$

Su representación gráfica ya no es en un plano cartesiano (x, y), como en una regresión lineal simple. En este caso ahora se representa en un sistema coordenado tridimensional (x1, x2, y) para el caso de tener dos variables independientes y una dependiente.

*Tabla 1. Estadística descriptiva de los datos de Vp, Vs y Vsh.*

**Estadística Descriptiva**

Variable	Conteo	Media	Desviación Estándar	Valor mínimo	Valor Máximo
$V_p$ (m/s)	35931	3469.53	2529.76	2301.54	6136.25
$V_s$ (m/s)	35931	1721.82	2103.17	806.62	4179.44
$V_{sh}$	35931	0.39	0.22	0.00	0.999

Después de realizar la estadística descriptiva se realizó la regresión lineal múltiple y se obtuvo un modelo a partir de los datos de la velocidad de corte que es la variable dependiente, la velocidad de corte y el volumen de arcilla, que son las variables independientes (ecuación 13).

$$V_s = 0.8037 V_p + 385.6931 V_{sh} - 1219.1988 \quad ; \quad R^2 = 0.9222 \dots (13)$$

### Determinación de módulos elásticos

Determinar los módulos elásticos para medios anisótropos a partir de registros es complicado debido a que no se cuenta con toda la información necesaria para obtener dichos módulos. En la metodología se determinan los coeficientes elásticos para medios transversalmente isótropos a partir de la densidad, las velocidades de propagación de onda ( $V_p$  y  $V_s$ ) y los parámetros anisotrópicos de Thomsen  $\epsilon$  y  $\gamma$  (1986), como se muestra en las siguientes expresiones:

$$C_{33} = \rho V_p^2 \dots \dots \dots (20)$$

$$C_{44} = \rho V_s^2 \dots \dots \dots (21)$$

$$C_{33} = \rho V_p^2 \dots \dots \dots (22)$$

$$C_{11} = C_{33}(2\epsilon + 1) \dots \dots \dots (23)$$

$$C_{66} = C_{44}(2\gamma + 1) \dots \dots \dots (24)$$

$$C_{12} = C_{11} - 2C_{66} \dots \dots \dots (25)$$

$$C_{13} = C_{33} - 2C_{44} \dots \dots \dots (26)$$

Para obtener los parámetros de Thomsen, Yongy Li (2006) desarrolló dos modelos para determinarlos a partir de la velocidad compresional, la velocidad de corte y el volumen de arcilla.

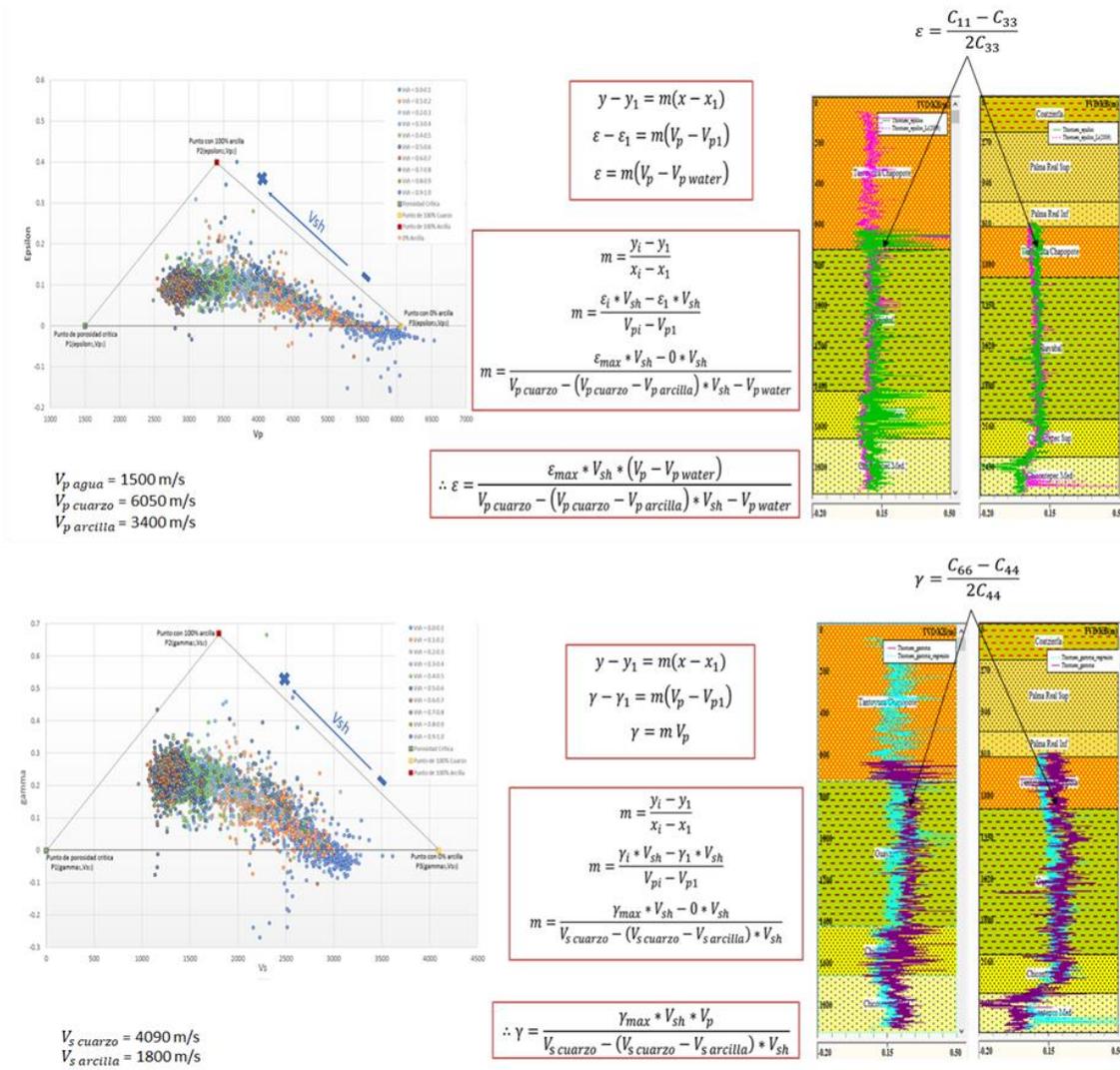


Figura 3. Calibración de modelos de Li (2006) para determinar los parámetros anisótropos.

Para poder utilizarlos en la determinación de las constantes elásticas a partir de registros, se calibraron los modelos debido a que los modelos fueron obtenidos a partir de datos de pruebas de laboratorio como se muestra en la figura 3.

### Esfuerzo vertical y Presión de poro

La densidad medida con registros de pozo se ve afectada por los fluidos contenidos en los poros de la roca, la calidad del agujero y la presencia de presiones anormales. Cuando la compactación de las rocas es “normal”, es decir, los fluidos son expulsados del medio poroso y la porosidad se reduce con la profundidad, la densidad del volumen poroso se incrementa con la profundidad. Para determinar el esfuerzo vertical o sobrecarga se utilizó el siguiente modelo (Velázquez, 2017).

$$S_v = \frac{\sum_{n=1}^n (\rho_o + kZ_i^m) [Z_i - Z_{i-1}]}{Z_i} \dots\dots\dots (27)$$

La presión de poro puede ser pronosticada en formaciones que siguen la teoría de la compactación (comúnmente lutitas), en otro tipo de formaciones, la presión de poro tiene que ser medida.

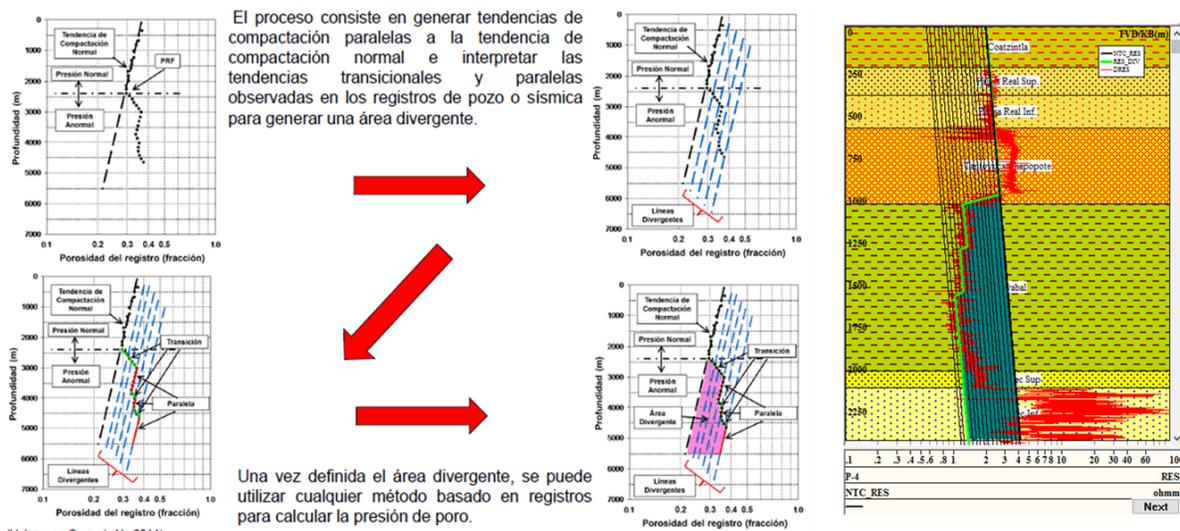


Figura 4. Método de divergencias (Velázquez et al., 2017).

Si la presión de poro es una envolvente de presión compartamentalizada, entonces, sus indicadores de presión se comportan como una “Área Divergente” (Velázquez et al., 2017).

Para determinar la presión de poro se utilizó el método de divergencias el cual consiste en generar tendencias de compactación paralelas a la tendencia de compactación normal en registros de resistividad y/o sísmico, para generar un área divergente (figura 4).

Una vez definida dicha área se puede utilizar cualquier método basado en registros de pozo para calcular la presión de poro. Para este trabajo se utilizaron las expresiones de Eaton (1975) para calcular la presión de poro a partir de los registros de resistividad y tiempo de tránsito.

$$P_p = OBG - (OBG - P_p) \left( \frac{R_o}{R_n} \right)^\alpha \dots\dots\dots (28)$$

$$P_p = OBG - (OBG - P_p) \left( \frac{DT_n}{DT_o} \right)^\alpha \dots\dots\dots (29)$$

### Determinación de deformaciones horizontales

A partir de pruebas de goteo se determinaron las deformaciones horizontales. Partiendo de la ecuación para determinar los esfuerzos horizontales para medios VTI (ecuación 30).

$$\sigma_h = \alpha_x P_p + \frac{C_{13}}{C_{33}} (\sigma_v - \alpha_z P_p) + (C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \varepsilon_h + (C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}) \varepsilon_H \dots\dots (30)$$

Suponemos que nuestras deformaciones horizontales máxima y mínima tienen una relación que varía entre 1 y 2, es decir,  $\varepsilon_H = n * \varepsilon_h$  donde  $n = 1.0, 1.1, \dots, 2$ . Sustituimos en la ecuación 30 y despejamos  $\varepsilon_h$ , quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\varepsilon_h = \frac{\sigma_h - \alpha_x P_p - \frac{C_{13}}{C_{33}} (\sigma_v - \alpha_z P_p)}{C_{11} + n C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}} (1+n)} \dots\dots\dots (31)$$

Para este caso se determinaron las deformaciones horizontales de manera puntual. A las profundidades donde se encuentran las pruebas de goteo. Posteriormente se utilizó la ecuación siguiente para determinar el  $\varepsilon_H$ :

$$\varepsilon_H = \frac{\sigma_h - \alpha_x P_p - \frac{C_{13}}{C_{33}}(\sigma_v - \alpha_z P_p) - \left(C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}\right)\varepsilon_h}{C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}} \dots\dots\dots (32)$$

### Determinación de esfuerzos horizontales

A partir de los modelos de la ley de Hooke se determinan los esfuerzos horizontales para medios transversalmente isótropos.

$$\sigma_h = \alpha_x P_p + \frac{C_{13}}{C_{33}}(\sigma_v - \alpha_z P_p) + \left(C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}\right)\varepsilon_h + \left(C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}\right)\varepsilon_H \dots\dots\dots (33)$$

$$\sigma_H = \alpha_y P_p + \frac{C_{13}}{C_{33}}(\sigma_v - \alpha_z P_p) + \left(C_{12} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}\right)\varepsilon_h + \left(C_{11} - \frac{C_{13}^2}{C_{33}}\right)\varepsilon_H \dots\dots\dots (34)$$

### Aplicación

El área de estudio se encuentra a 12 km al oeste de Potrero del Llano. Se definió esta área ya que aflora una formación con alto contenido de arcilla y en la cual podemos obtener muestras representativas, con el objetivo de realizar pruebas ultrasónicas a las muestras y corroborar que el tipo de medio que presentan las lutitas es trasversalmente isotrópico transversal.

Al definir el área de estudio se analizó la información disponible de los pozos que se encuentran dentro del área de estudio. Del análisis se identificaron 16 pozos con información de registros de pozo de los cuales 12 cuentan con pruebas de goteo.

La metodología nos permitió caracterizar y evaluar la influencia que tiene la anisotropía en rocas sedimentarias con alto contenido de arcilla. Se determinaron los esfuerzos horizontales aplicando la metodología y al mismo tiempo obteniéndolos de la forma convencional, es decir, como medios isótropos. El objetivo que tuvo realizar

esta comparación, entre un medio isótropo y un medio transversalmente isótropo, es realizar el análisis de sensibilidad para demostrar la influencia que tiene la anisotropía en las rocas sedimentarias, especialmente en rocas arcillosas.



Figura 5. Ubicación del área de estudio y de los pozos utilizados para la calibración de los modelos.

## Resultados

Una vez obtenidas las deformaciones horizontales para varios pozos de la misma cuenca, se realizó un análisis de la relación que existe entre las deformaciones máxima y mínima. Para el caso del área de estudio las formaciones de lutitas y arenas arcillosas se obtuvieron las siguientes relaciones de deformaciones horizontales.

Tabla 2. Relaciones de deformaciones horizontales para lutitas y arenas arcillosas.

Lutitas			Arenas		
$\epsilon_h$	$\epsilon_H$	$\epsilon_H/\epsilon_h$	$\epsilon_H$	$\epsilon_H$	$\epsilon_H/\epsilon_h$

3.80E-05	6.49E-05	1.72	-7.12E-05	-1.29E-04	1.84
----------	----------	------	-----------	-----------	------

Con las deformaciones horizontales determinadas se determinaron los esfuerzos horizontales y se realizó la comparación entre los esfuerzos horizontales menores obtenidos tanto para un medio isótropo como para un VTI, donde se demuestra la importancia que se tiene considerar la anisotropía (Figura 6).

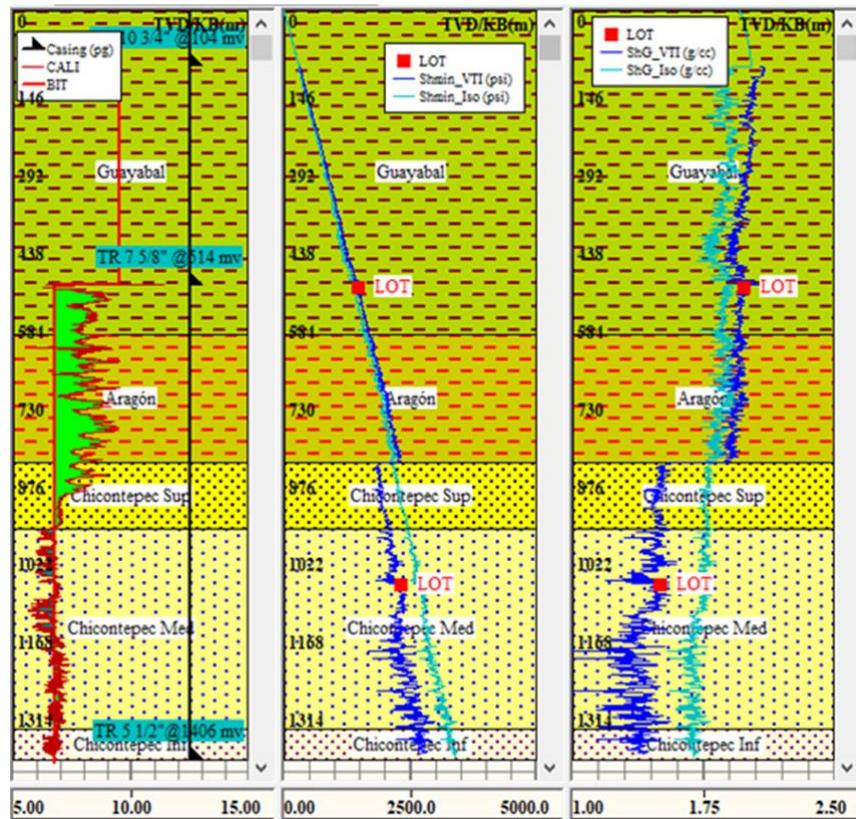


Figura 6. Comparación de los perfiles de esfuerzos horizontales menores obtenidas para un medio isótropo y un VTI.

Observamos en la figura 10 la importancia de implementar los modelos que involucran la anisotropía, con la finalidad de establecer mejores estrategias en la

estabilidad de pozos. Al utilizar los modelos convencionales se realizan predicciones erróneas de los esfuerzos in situ, ya sea subestimando o sobrestimando los valores.

En la figura 11 se muestra el resultado final de la determinación de las deformaciones horizontales, dentro de la ventana operativa de un pozo del área de estudio.

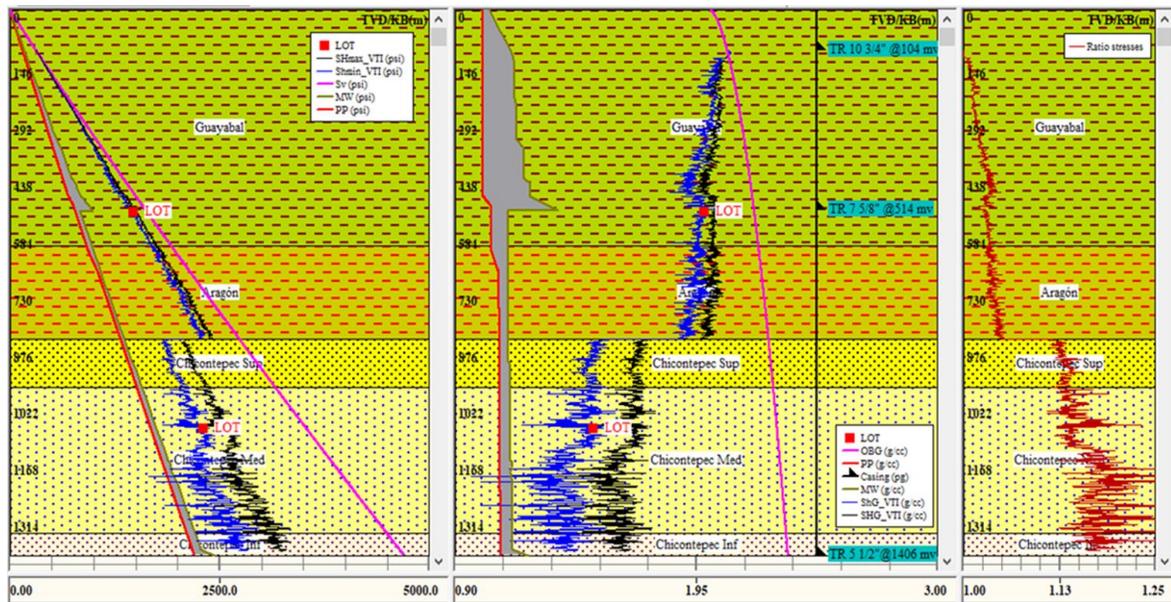


Figura 11. Ventana operativa considerando la anisotropía en los esfuerzos horizontales y la relación de ambos.

También, se observa en la figura 11 que para formaciones lutíticas en esta cuenca la relación entre el esfuerzo horizontal máximo y el esfuerzo horizontal mínimo se encuentra en el rango de 1.03 a 1.06 y para formaciones de arenas con alto contenido de arcilla los rangos se encuentran entre 1.13 a 1.19.

## Conclusiones

Para el presente trabajo se desarrolló una metodología para determinar los esfuerzos horizontales considerando la anisotropía presente en las lutitas, a partir de información básica de registros de pozo.

Durante el desarrollo de la metodología se obtuvo un modelo empírico para obtener la velocidad de corte a partir de la velocidad compresional y el contenido de arcilla, cuya ventaja es que puede ser aplicada a toda la profundidad del pozo y no por litologías como es con el modelo de Greenberg y Castagna (1992).

Para la determinación de los módulos elásticos se recurrió a los modelos de Li (2006) para determinar los parámetros anisótropos de Thomsen ( $\epsilon$  y  $\gamma$ ). Estos modelos tuvieron que ser calibrados con datos de pozos cercanos al área de estudio.

Así también, se determinó una relación de deformaciones horizontales característica que puede ser aplicada para pozos que no cuenten con pruebas de goteo.

Al definir un modelo que considere la anisotropía y las deformaciones horizontales en la determinación de los esfuerzos horizontales realizamos una prognosis correcta para el estudio en la estabilidad de pozos. La cual comprobamos aplicándola en un área determinada y evaluada con valores como son las pruebas de goteo equivalente al esfuerzo horizontal mínimo, obteniendo un perfil de esfuerzos que se ajusta a las pruebas reduciendo la incertidumbre en la perforación.

Cabe señalar que la metodología puede ser tomada para el análisis de estabilidad en tiempo real. Con esto el pozo podría permanecer estable durante toda la operación de perforación, al tener una mayor certidumbre, conlleva a que nuestra operación se complete con éxito.

### **Agradecimiento**

Los autores desean agradecer al Instituto Mexicano del Petróleo el apoyo para desarrollar este trabajo.

### Referencias

1. Chenevert M. E. & Gatlin C. (1964). Mechanical Anisotropies of Laminated Sedimentary Rocks. Presented at 39th Annual Fall Meeting of SPE in Houston, Tx. Oct.11- 14.
2. Eaton, B. A. (1975). The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. Society of Petroleum Engineers. <http://doi:10.2118/5544-MS>.
3. Franquet, J. A., & Rodríguez, E. F. (2012). Orthotropic Horizontal Stress Characterization from Logging and Core Derived Acoustic Anisotropies. In 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
4. Frydman, M. (2010). Determinations of the Dynamic Elastic Constants of a Transverse Isotropic Rock Based on Borehole Dipole Sonic Anisotropy in Deviated Wells. IBP2304 10.
5. Gala, D. M. et al. (2010). Drilling Hazard Mitigation Technologies Key in Eliminating Non-Productive Time in Challenging Wells. In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
6. Greenberg, M. L., & Castagna, J. P. (1992). Shear wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications. Geophysical prospecting, 40(2), 195-209.
7. Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2007). Fundamentals of rock mechanics. Blackwell Publishing.
8. Li, Y. (2006). An empirical method for estimation of anisotropic parameters in clastic rocks. The Leading Edge, 25(6), 706-711.
9. López-Solís et al. (2011). Análisis de pruebas de goteo extendidas para la determinación del gradiente de fractura y esfuerzo mínimo. VII INGEPET.
10. Moronkeji, Dee A., et al. (2014). Anisotropic Stress Profiling and Tectonic Strain Calibration in a Tight Basement Formation. ISRM Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure-SBMR 2014. International Society for Rock Mechanics.



11. Ostadhassan, M., Zeng, Z., & Zamiran, S. (2012). Geomechanical modeling of an anisotropic formation Bakken case study. In 46th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
12. Thomsen, L. (1986). Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51(10), 1954-1966.
13. Velázquez Cruz, D. (2017). Curso: Presión de poro y geomecánica. Gerencia de Perforación y Terminación, Instituto Mexicano del Petróleo.
14. Velázquez Cruz, D. et al. (2017). New Methodology for Pore Pressure Prediction Using Well Logs and Divergent Area. 185557-MS SPE Conference Paper.
15. Velázquez Cruz, D. et al. (2017). Determination of Pore Pressure Using Divergences. *International Journal of Petroleum Science and Technology*. ISSN 0973-6328 Volume 11, Number 1, pp. 51-63.
16. Zhang, J. (2005). The Impact of Shale Properties on Wellbore Stability. Dissertation. The University of Texas. Austin, Tx.
17. Zhang, L. (2005). Engineering properties of rocks. Butterworth - Heinemann.

### **Trayectoria profesional del autor y coautores**

#### ***José Adalberto Morquecho Robles***

Es Ingeniero Petrolero por la Universidad Nacional Autónoma de México. Realizó servicio social y residencias profesionales en la Gerencia de Perforación y Terminación del Instituto Mexicano del Petróleo. Colaboró en la evaluación de la perforación y terminación de pozos y en la determinación del límite técnico no convencional en pozos Shale. Ha participado como coautor en más de 4 artículos sobre perforación de pozos y presentado conferencias en foros nacionales. Actualmente realiza estudios de Maestría en Ciencias de la Tierra en la Universidad Nacional Autónoma de México. Es miembro de la Society of Petroleum Engineers y la American Rock Mechanics Association.

#### ***David Velázquez Cruz***

Ingeniero Petrolero por el Instituto Politécnico Nacional, Maestro en Ciencias de la Computación por la Universidad Autónoma Metropolitana, con estudios de Doctorado en Explotación de Hidrocarburos por el Instituto Mexicano del Petróleo; Ha publicado 11 artículos como autor y 19 como coautor sobre tecnologías de perforación y presentado 34 conferencias sobre el mismo tema. Tiene más de 25 años de trayectoria en el Instituto Mexicano del Petróleo donde ha dirigido y colaborado en más de 30 proyectos sobre tecnologías de perforación; Es Instructor certificado por la Secretaría de Educación Pública y Perito en la Especialidad de Perforación de Pozos por el Colegio de Ingenieros Petroleros de México.

#### ***Gustavo Espinosa Castañeda***

Es Ingeniero Petrolero y Maestro en Ciencias por el Instituto Politécnico Nacional, con más de 17 años en la Industria Petrolera Nacional en proyectos de Ingeniería de Perforación y estabilidad de Pozos. Trabajó en Petróleos Mexicanos, Región Sur, en SFG Global, Consulting, y actualmente es Investigador en Ingeniería Petrolera de la





# MEMORIAS

## Congreso Mexicano del Petróleo 2018

Acapulco, Gro. MEXICO

Gerencia de Perforación y Terminación de pozos del Instituto Mexicano del Petróleo. Ha publicado como autor y coautor en más de 15 artículos y presentado más de 20 conferencias en foros nacionales e internacionales, tiene 2 marcas registradas y 13 derechos de autor. Es Instructor Certificado por la SEP-CONOCER y Perito Petrolero por el Colegio de Ingenieros Petroleros de México, es miembro de la SPE y del CIPM.

