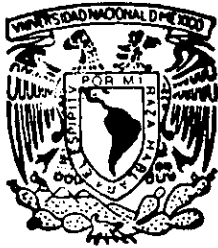


01174



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

9  
2ef.

"ANALISIS DE OVALIDAD PARA LA OBTENCION  
DE LA ORIENTACION DE LOS ESFUERZOS  
HORIZONTALES"

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERIA PETROLERA**  
SUSTENTA

**ING. CUAUHEMOC SOTO SANCHEZ**



259/63

MEXICO, D. F.

1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DEPARTAMENTO DE EXPLORACION Y EXPLOTACION  
DE RECURSOS ENERGETICOS DEL SUBSUELO

SECCION DE INGENIERIA PETROLERA

M. EN I. ABEL HERRERA CAMACHO  
ENCARGADO DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
U. N. A. M.  
P R E S E N T E.

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado Director de Tesis del alumno CUAHTEMOC SOTO SANCHEZ, inscrito en la Maestría en Ingeniería Petrolera, manifiesto a usted la aceptación a esta designación.

El nombre de la Tesis a desarrollar es: "ANALISIS DE OVALIDAD PARA LA OBTENCION DE LA ORIENTACION DE LOS ESFUERZOS HORIZONTALES

El tiempo estimado para concluir es de seis meses.

Quedo enterado de que formará parte del examen en la fecha y hora que me comunicarán posteriormente.

A t e n t a m e n t e.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, a 2 de Octubre de 1997

M. C. DANIEL GARCIA GAVITO

RCV\*bbv

B:\ACEPTES1.WP

*Ante todo gracias a ti  
"DIOS"*

*Dedico este trabajo a mi Esposa  
SAMANTHA y a mi hijo  
IAN con todo mi amor.*

*A mis PADRES y HERMANOS les  
agradezco todo su apoyo y comprensión.*

*Al M. en J. Enrique Gorian Maldonado  
gracias por su apoyo incondicional.*

## Contenido:

	Página
<b>Resumen.....</b>	1
<b>1. Introducción.....</b>	2
<b>2. Descripción del problema y objetivo.....</b>	3
<b>3. Estado de los métodos para determinar los esfuerzos in-situ..</b>	4
3.1 Técnicas y objetivos.....	4
3.1.1 Pruebas de microfractura.....	4
3.1.2 Pruebas de microfractura con extensómetro de agujero.....	6
3.1.3 Pruebas de recuperación de deformación anelástica (ASR).....	7
3.1.4 Imágenes del pozo.....	9
3.1.5 Registros de calibración.....	10
3.1.6 Datos sísmicos.....	11
3.1.7 Empacadores de impresión.....	12
<b>4. Ovalidades en el pozo y su relación con el estado de esfuerzos in-situ.....</b>	13
4.1 Evidencia en el campo de ovalidades.....	13
4.2 Mecanismo de formación.....	20
4.2.1 Efecto del fluido en el pozo en una ovalidad.....	26
4.4.2 Coeficiente de deslizamiento friccional de las rocas.....	27
4.3 Detección de una ovalidad.....	29
<b>5. Desarrollo de un programa de cómputo que permite conocer zonas con ovalidad en el pozo.....</b>	34
5.1 Elementos básicos para el análisis de un pozo .....	34
5.2 Funcionamiento del programa.....	35
5.3 Diagrama de flujo.....	38
5.4 Programa de cómputo.....	39
5.5 Ejemplo de aplicación.....	41

<b>6. Desarrollo de un programa de cómputo que permita conocer la magnitud de los esfuerzos horizontales en la formación a partir de la ovalidad del pozo.....</b>	<b>51</b>
6.1 Elementos básicos para el análisis de un pozo.....	51
6.2 Bases teóricas.....	52
6.3 Funcionamiento del programa.....	55
6.4 Diagrama de flujo.....	56
6.5 Programa de cómputo.....	57
6.6 Ejemplo de aplicación.....	59
<b>7. Aplicación del programa a un campo de la zona marina.....</b>	<b>72</b>
<b>8. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>88</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>90</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>94</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>95</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>97</b>

## **Resumen**

Cualquier información que pueda contribuir a una mejor planeación de la perforación y terminación de un pozo petrolero, debe considerarse muy valiosa.

El conocimiento de los esfuerzos principales horizontales que actúan en la corteza terrestre, son de gran importancia en el desarrollo de la perforación y terminación de un pozo.

Existen diversos métodos para obtener dichos esfuerzos, pero la gran mayoría son indirectos y en general muy costosos, además de que requieren de una intervención especial. Diversos investigadores han encontrado una gran relación entre la ovalidad del agujero y el estado de esfuerzos in-situ, por otro lado los datos de registros de calibración de cuatro brazos nos dan un indicio de dicha ovalidad del agujero.

Este trabajo muestra la relación directa que existe entre el azimut de la ovalidad del agujero determinada por medio de un registro de calibración de cuatro brazos y el estado de esfuerzos in-situ que actúa en la formación.

## 1. Introducción

En la perforación de un pozo petrolero es común encontrarse con problemas de inestabilidad en las paredes del pozo, lo que ocasiona diversas dificultades como derrumbes, colapso del agujero y atrapamiento de la sarta. Estos problemas están muy relacionados al estado de esfuerzos que predominan en la formación, por lo que una forma de predecir y remediar parte de estos problemas es conociendo dichos esfuerzos. Este problema es igualmente importante en operaciones de fracturamiento, donde el estado de esfuerzos que actúa alrededor del pozo es determinante.

A fin de obtener una mejor planeación en la perforación y desarrollo de un pozo, en otros países se han desarrollado técnicas para conocer la distribución de esfuerzos in-situ en el agujero. En México desafortunadamente no se efectúa este tipo de análisis.

En los pozos exploratorios, generalmente se tiene una enorme cantidad de información que puede ser determinante en el buen desarrollo de un campo, alguna de esta información como las curvas de calibración de los registros de echados (HDT) no son utilizados en todo su potencial. En este trabajo se trata de aprovechar dicha información y adecuarla a los estudios de ovalidad del pozo, para posteriormente determinar la orientación y magnitud de los principales esfuerzos horizontales. Esta técnica representa una herramienta no utilizada en México, y puede contribuir a mejorar el diseño de la perforación de pozos y los trabajos de fracturamiento.



## **2. Descripción del Problema y Objetivo**

El conocimiento de la orientación y magnitud de los esfuerzos horizontales in-situ en un área petrolera específica, es importante para la planeación del desarrollo de la misma, y/o para el diseño individual de un pozo y su estrategia de terminación.

Existen diversos métodos para conocer la magnitud y orientación de los esfuerzos in-situ que actúan alrededor del agujero, entre los que destacan los de pruebas de microfractura, núcleos orientados, registros especiales etc.; desafortunadamente cada uno requiere de una intervención especial, por lo que su aplicación se traduce en costos elevados.

No es de uso común en México la práctica de ninguno de estos métodos, es por eso que uno de los objetivos de este trabajo es conocer dichos esfuerzos y que sirvan de alguna manera para un conocimiento mayor de la zona perforada. En principio, este trabajo trata de tomar como base los pozos exploratorios de la zona marina de México, ya que es en este tipo de pozos donde se cuenta con mayor información disponible debido a su misma naturaleza, además servirían como base para un futuro desarrollo del campo que se trate.

Este trabajo, utiliza como base cualquier registro que cuente con dos curvas calibradoras, a partir de aquí se obtiene mediante un programa de cómputo las zonas que puedan considerarse como una elongación del agujero (breakout), causada por una diferencia entre los esfuerzos horizontales que estén actuando en el pozo; posteriormente se analizan estas zonas para determinar la orientación y magnitud de los principales esfuerzos horizontales.

### **3. Estado de los Métodos para Determinar los Esfuerzos In-Situ**

#### **3.1 Técnicas y objetivos**

Los tres esfuerzos principales que existen en una formación son referidos generalmente como un esfuerzo de sobrecarga, un esfuerzo horizontal máximo y un esfuerzo horizontal mínimo. Las fracturas inducidas se propagan en la dirección perpendicular al esfuerzo horizontal mínimo. Si se tiene planeado perforar un pozo, este puede perforarse de tal forma que las fracturas proporcionen mayor conductividad basándose en la dirección y magnitud de los esfuerzos horizontales en un pozo. Si no existe base de datos o historia de pozos anteriores, se deberán realizar pruebas para conocer dichos esfuerzos, actualmente existen diversos métodos que nos permiten conocer la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ, los cuales serán discutidos a continuación.

##### **3.1.1 Pruebas de microfractura**

El propósito de estas pruebas es el de determinar la magnitud y dirección del esfuerzo mínimo principal de la formación. Las pruebas son desarrolladas comúnmente mediante inyección en una pequeña zona aislada (de 4 a 15 pies) a bajos gastos (1 a 25 gal/min). El esfuerzo in-situ mínimo es determinado normalmente del análisis de la declinación de la presión después del cierre, pero algunas veces se determina del análisis del incremento de presión al principio del ciclo de inyección. Como la presión de cierre de la fractura o la presión para reabrir la fractura es igual a un esfuerzo aplicado que nominalmente podría abrir una fractura existente y de esta forma superar el esfuerzo principal mínimo, estas dos presiones son definidas generalmente iguales al esfuerzo mínimo horizontal.

Las pruebas de microfractura son comúnmente desarrolladas con tres o cuatro ciclos de inyección usando volúmenes de fluido del rango de 30 a 200 gal (ver fig. 3.1)

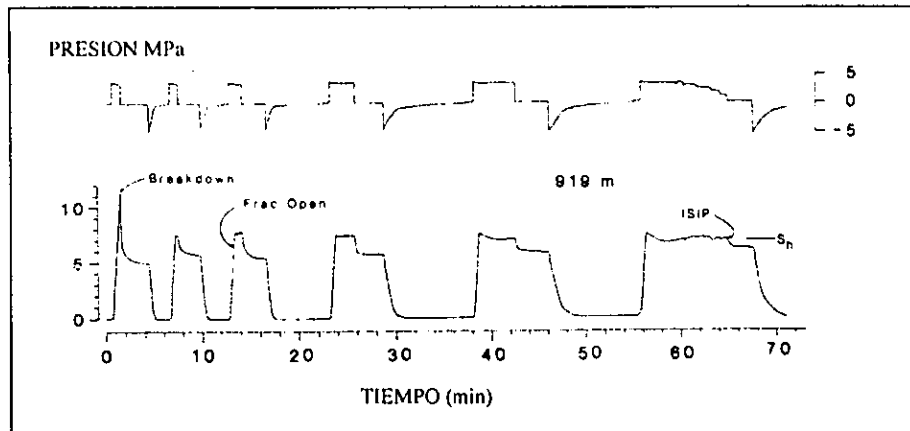


Fig. 3.1 Gráfica de tiempo contra presión para una prueba de fracturamiento hidráulico<sup>11</sup>

El azimut de la fractura (dirección del esfuerzo horizontal máximo) puede ser determinado de una prueba de microfractura en agujero descubierto. Cuando la prueba de microfractura se está efectuando en una zona aislada en el fondo del pozo, una porción de esta fractura inducida puede ser recuperada mediante un núcleo orientado. La dirección de la fractura creada puede ser correlacionada con la orientación del núcleo, proporcionando el azimut de la fractura.

Porciones no fracturadas del núcleo orientado pueden ser usadas en pruebas de recuperación de deformación anelástica. Un registro de imágenes algunas veces puede ser usado para determinar el azimut de la fractura después de la prueba.

Para este tipo de pruebas es necesario equipo especial como el extensómetro de agujero que ha sido desarrollado para una mejor medición de estas pruebas, así como manifolds especiales para obtener los bajos gastos de inyección usados en estos tipos de pruebas.

### 3.1.2 Pruebas de microfractura con extensómetro de agujero

El extensómetro de agujero es un calibrador de multibrazos de alta precisión orientado, con sistemas de medición de presión y de temperatura. Se utilizan unos empacadores no magnéticos para aislar la zona a investigar. El extensómetro mide la deformación del agujero antes, durante y después de la iniciación y propagación de la fractura hidráulica. La información se reúne y analiza para obtener la dirección in-situ de los esfuerzos, para determinar propiedades mecánicas de la formación y medir la presión de cierre de la fractura y su amplitud.

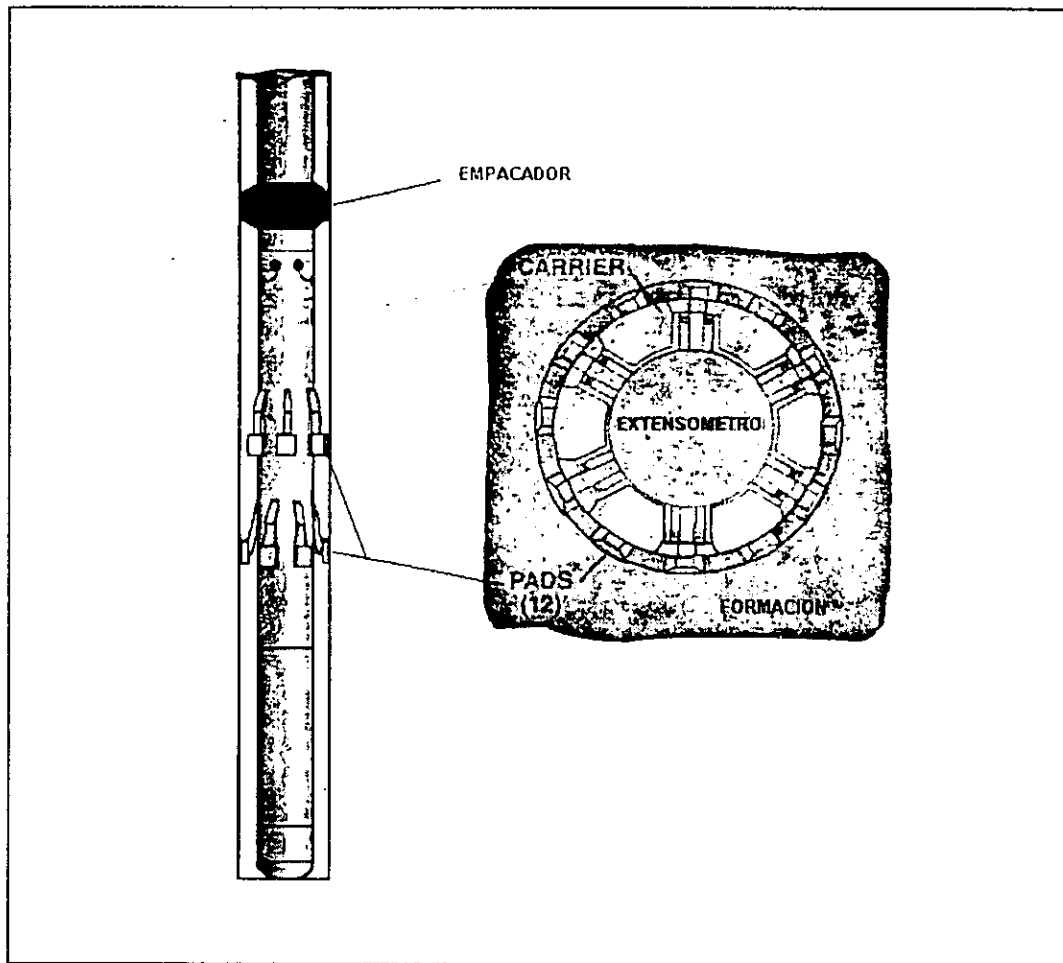


Fig. 3.2 - Herramienta extensómetro de agujero, usada para obtener los esfuerzos in-situ.

El extensómetro de agujero es bajado con línea y cuenta con lectura superficial en tiempo real. Las observaciones en tiempo real permiten la determinación de cuando la fractura se ha iniciado así como su dirección relativa. Cabe señalar que se requiere un análisis detallado de los datos para obtener un resultado exacto (ver fig. 3.2)

### **3.1.3 Pruebas de recuperación de deformación anelástica (ASR)**

Este método es usado para conocer la dirección de los esfuerzos in-situ de la formación. Este método está basado en la teoría de que un núcleo crece o encoge cuando los esfuerzos in-situ son removidos. Durante el proceso de disminución los esfuerzos crean microfracturas que se forman dentro del núcleo de prueba.

El medio poroso que está confinado por una fuerza a una elevada temperatura se dice que está en estado in-situ. El confinamiento es removido y la muestra de roca es expuesta a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente. Los minerales y cristales de la roca exhiben una cierta densidad y diseño estructural bajo determinadas condiciones de esfuerzos y temperaturas. Cuando una muestra de material es removida de sus esfuerzos de confinamiento, sus minerales y componentes tratan de alcanzar el estado físico al cual normalmente existían a condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente, lo cual generalmente resulta en una expansión de los componentes minerales y cristalinos del material. La variación entre las relaciones de expansión de los componentes cristalinos/minerales y los componentes cementantes producen un crecimiento diferencial. Las fuerzas internas de cohesión y resistencia mecánica del material cementante deben ser excedidas antes de que ocurra un rompimiento en la matriz de la roca, la cual resulta en la formación de una microfractura. El número de microfracturas es dictado por la expansión de los

minerales, la cual es función de la magnitud y la orientación de los esfuerzos de confinamiento y de la fuerza e integridad de los materiales cementantes.

La presencia de esfuerzos de confinamiento no uniformes conduce a una expansión no uniforme de los minerales, de tal manera que la orientación de las microfracturas es una función de la orientación de los esfuerzos. La apertura del mayor número de microfracturas es perpendicular al máximo esfuerzo, mientras que el menor número de microfracturas se abren en sentido opuesto al mínimo esfuerzo.

El propósito de las pruebas ASR es la de determinar la orientación de los cambios en las dimensiones del núcleo. El cambio de tamaño es debido a la formación de microfracturas en la muestra, y corresponde a la reacción de la matriz al remover los esfuerzos in-situ. La magnitud de la expansión medible de la roca es función de los siguientes parámetros:

1. Profundidad de la muestra
2. Composición de la matriz de la muestra
3. Magnitud de los esfuerzos in-situ
4. Tiempo desde que la muestra fue recuperada
5. Cambio en la presión de la muestra
6. Permeabilidad y porosidad de la muestra
7. Cambio en la saturación de la muestra.

### 3.1.4 Imágenes de pozo

Las imágenes de pozo acústicas o resistivas, son tomadas para determinar la presencia de cualquier fractura natural o inducida en la pared del pozo. Esta información proveerá la magnitud relativa de las fracturas así como información concerniente a su orientación. (ver fig. 3.3)

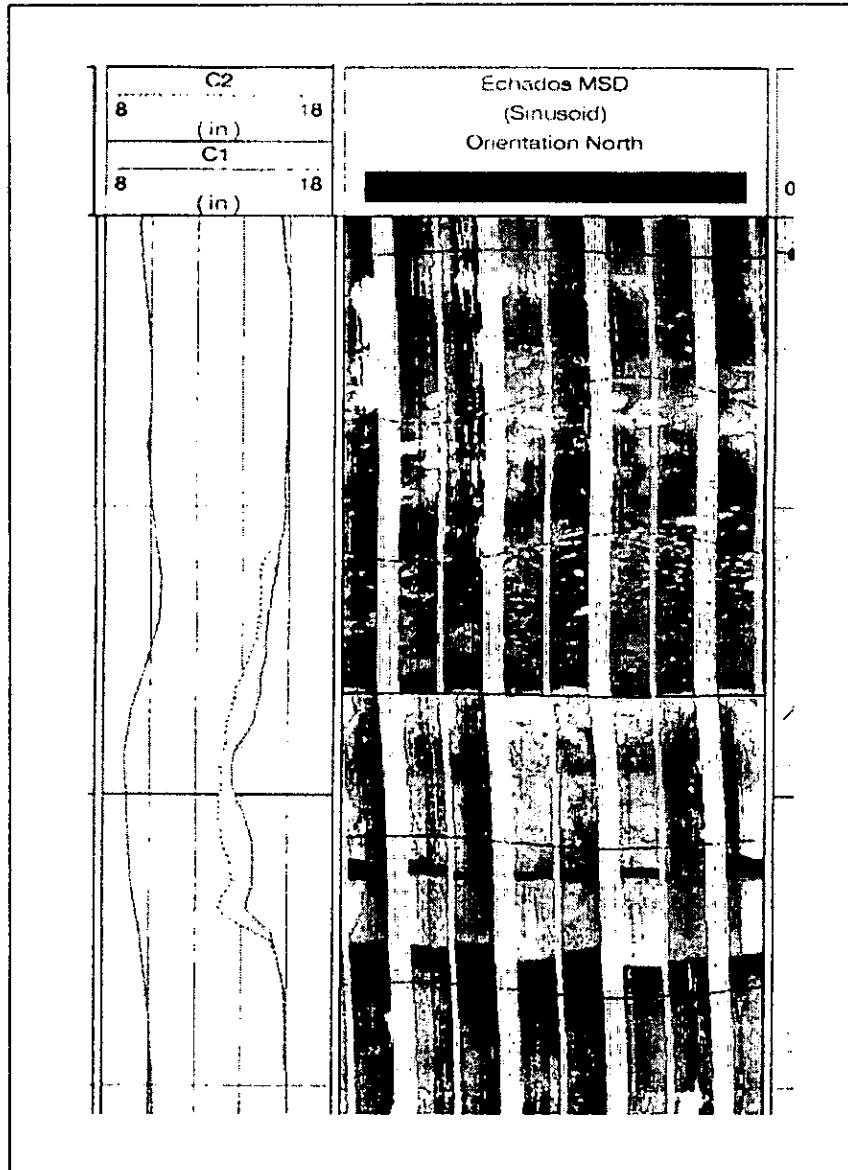


Fig. 3.3 Registro de imágenes FMI

Los registros de imágenes son utilizados para observar las fracturas naturales e inducidas que interceptan la pared del pozo. Estas herramientas cuentan con cabezas transmisoras como con receptoras que rotan alrededor del eje de la herramienta. Cuando la cabeza rota transmite impulsos que viajan a la pared del pozo, se reflejan y regresan a los receptores de la misma. En la imagen resultante las áreas lisas de la pared del pozo aparecen como ligeramente coloreadas, mientras que las fracturas y áreas rugosas aparecen como áreas oscuras. La orientación de la cabeza transmisora/receptora puede ser relacionada al azimut en cualquier instante, de esta forma se puede obtener información relacionada con la orientación de la fractura.

### **3.1.5 Registros de calibración**

Las ovalidades (breakouts) ocurren en la pared del pozo cuando la concentración de esfuerzos alrededor del agujero excede la resistencia compresiva de la formación. La ovalidad del pozo es medida con una herramienta calibradora. El agujero tiende a fracturarse o a ser elíptico en la dirección paralela al esfuerzo horizontal mínimo.

Las irregularidades en los diámetros medidos por los brazos calibradores pueden ser el resultado de una ovalidad, con lo cual tenemos un indicador de la orientación del esfuerzo horizontal mínimo. Los brazos de la herramienta calibradora siempre permanecen en contacto con las paredes del pozo, por lo que se tendrá al final del registro un par de curvas que nos indican la condición del agujero a lo largo del pozo. (ver fig. 3.4)



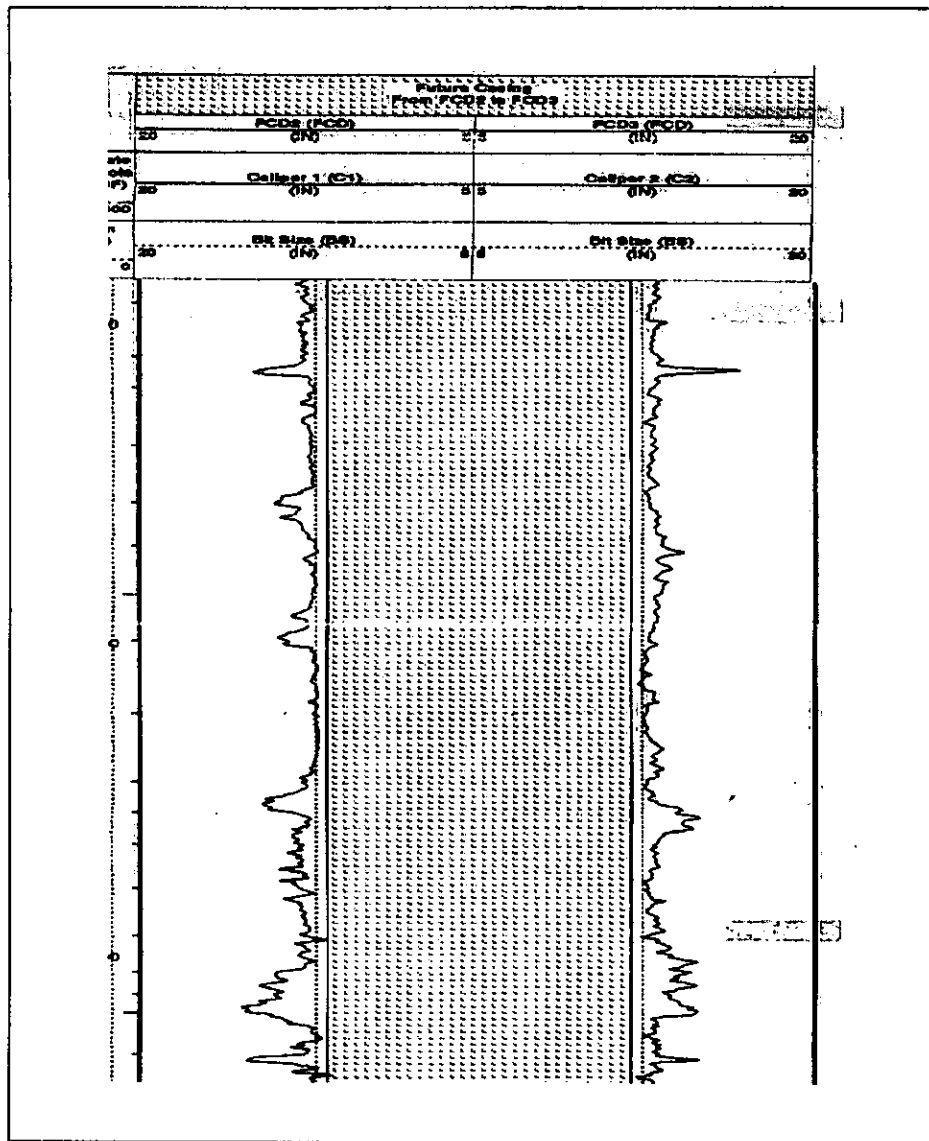


Fig. 3.4 Registro de geometría de agujero, se puede observar como ambos calibradores tienden a separarse en las mismas zonas, provocado tal vez por una ovalidad.

### 3.1.6 Datos sísmicos

Los datos sísmicos en dos dimensiones se pueden utilizar para definir el perfil general de la estructura y la tendencia principal de falla. Un trabajo sísmico de alta resolución en tres dimensiones permite hacer un mapeo estructural y además se

tendría mayor detalle en la localización de fallas, con esto se podría inferir hacia donde se tiene la dirección de los esfuerzos máximo y mínimo in-situ.

### **3.1.7 Empacadores de impresión**

Este es un método directo que provee una buena aproximación en la determinación del azimut, altura y amplitud de la fractura. Consiste en un empacador de impresión que cuenta con camisas maleables de caucho que cubren el elemento de metal que puede ser expandido por métodos hidráulicos o mecánicos. La fractura deja una marca que es estudiada al sacar la herramienta.

## **4. Ovalidades en el pozo y su relación con el estado de esfuerzos in-situ**

### **4.1 Evidencia de ovalidades en el campo**

Los datos de un registro de calibración de cuatro brazos se han utilizado para demostrar que existen secciones en el pozo llamadas ovalidades, las cuales son consistentes a lo largo del pozo. Diversos investigadores<sup>32</sup> [Cox, 1970; Babcock, 1978; Schafer, 1980; Brown, 1980; Bell y Gough, 1979; Hickman, 1982; Plumb, 1982] han propuesto que el azimut de la dimensión mayor del agujero es paralelo al azimut del mínimo esfuerzo horizontal.

Las ovalidades del pozo pueden ser importantes indicadores de los esfuerzos in-situ debido a la alta correlación que existe entre la orientación de la ovalidad y las direcciones de los esfuerzos principales. La ventaja de usar el fenómeno de las ovalidades del agujero para estimar el estado de esfuerzos in-situ son obvias. El registrar un agujero para detectar la existencia, la forma, el tamaño y la orientación de las ovalidades es considerablemente más rápida y menos costosa que pruebas de hidrofractura, y pueden proveer información importante cuando es usada como técnica de respaldo, o para suplir de la única estimación de esfuerzos cuando otros métodos no pueden ser empleados. En pozos ultraprofundos que se perforan costa afuera, el estudio de las ovalidades puede ser la única fuente de información de esfuerzos in-situ, ya que la probabilidad de ocurrencia incrementa con mayores profundidades, mientras que la aplicación de métodos convencionales se reduce drásticamente.

Las ovalidades del pozo fueron reportadas hace apenas treinta años atrás<sup>32</sup> (Leeman, 1964). Leeman encontró en pozos perforados a gran profundidad en

cuarcitas y conglomerados de las minas de Witwaterstand en el sur de Africa tendían a fracturarse selectivamente a lo largo de la pared del pozo. Encontró que este fracturamiento es el resultado de esfuerzos compresivos excesivos, de tal forma que los segmentos de roca rotos o fracturados son perpendiculares al esfuerzo horizontal máximo principal. Sin embargo fue hasta que apareció el registro Dipmeter<sup>32</sup> de alta resolución de cuatro brazos de la compañía Schlumberger cuando el fenómeno de la ovalidad del agujero pudo estudiarse mas a fondo.

El análisis de la formación de ovalidades por Bell y Gough<sup>32</sup> (1981,1982) mostró que las ovalidades son regiones fracturadas en cada lado del pozo, las cuales están alineadas con el azimut del mínimo esfuerzo horizontal  $S_h$  donde la concentración de esfuerzos fue mayor. Ellos sugirieron que las ovalidades fueron el resultado de fallamiento compresivo y su análisis mostró que la región de falla puede ser triangular en su sección transversal, circundado por planos orientados a un ángulo constante al azimut del campo de los principales esfuerzos horizontales. En otras palabras, las ovalidades podrían tener la apariencia de orejas puntiagudas en extremos opuestos del pozo. Sin embargo la principal fuente de información acerca de las ovalidades del pozo fueron los registros de cuatro brazos, esta teoría podría no ser probada debido a que estos instrumentos proporcionan solo dos diámetros ortogonales como función de la profundidad y no se tiene información disponible de la forma detallada de las ovalidades.

Para superar las limitaciones de los datos del caliper de cuatro brazos, se ha analizado la forma detallada de las ovalidades en una variedad de tipos de rocas usando datos del registro ultrasónico televiwer. El televiwer<sup>11</sup> es un registro que

provee una imagen ultrasónica continua y orientada de la pared del pozo, consiste de un transductor piezoeléctrico rotatorio, magnéticamente orientado el cual emite y recibe un pulso ultrasónico acústico ( $\sim 1$  Mhz) que es reflejado por la pared del pozo a 600 veces por revolución, de tal manera que una buena reflexión corresponde a una traza brillante y una traza oscura indica absorción de señal. Los patrones característicos de este registro son producidos por fracturas, deslaves, huecos y otras características. En aplicaciones típicas del televiwer la reflectividad del agujero o uniformidad es graficada como función del azimut y profundidad desplegando la amplitud del pulso reflejado como brillantez en un osciloscopio triaxial. Esto resulta en una imagen desenvuelta de la superficie del pozo. El televiwer previamente tuvo buena efectividad en el estudio de fracturas que intersectan los pozos<sup>11</sup> (Seeburger y Zoback, 1982). En muchos casos, las ovalidades se pueden observar en registros del televiwer como regiones de baja reflectividad. Por análisis del tiempo de viaje del pulso acústico como función del azimut, podemos ser capaces de construir secciones transversales detalladas del pozo en intervalos donde ocurren ovalidades. La conversión del tiempo de viaje a tamaño del agujero es directa ya que el diámetro del agujero es conocido de las mediciones del caliper.

La fig. 4.1 muestra datos de ovalidad de un pozo cerca de Auburn, Nueva York, la figura 4.1a muestra la reflectividad del televiwer en una zona de ovalidades en el pozo de 6.5 m, y la fig. 4.1b muestra una vista de la sección transversal del pozo a una profundidad de 1476.3 m. Note que las ovalidades son básicamente amplias y con depresiones en los flancos y no tienen la característica oreja afilada predecida por la teoría de Gough y Bell<sup>32</sup> (1981). Aunque las ovalidades mostradas en la fig. 4.1b no son simétricas y exactamente separadas  $180^\circ$ , la dirección principal de las ovalidades

en el pozo esta dentro de pocos grados de la dirección de la menor compresión horizontal, determinada por fracturamiento hidráulico en el mismo pozo (fig. 4.1c).

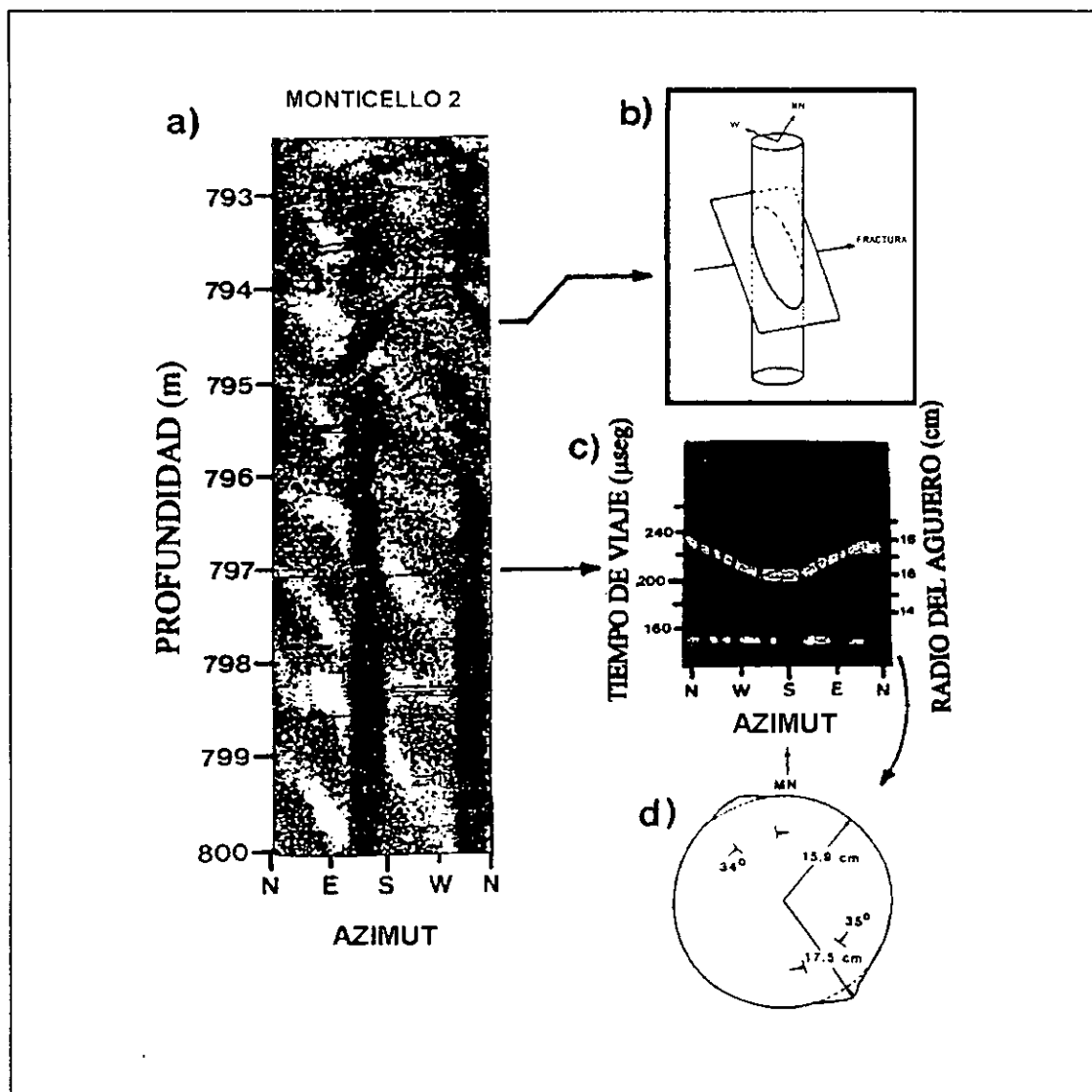


Fig. 4.1 (a) Reflectividad típica de un registro de televiwer en una sección de 7.5 m de un pozo perforado en roca granítica en Monticello, Carolina del Sur. La oscuridad sinusoidal (baja reflectividad) en el televiwer a 794.5 m es debida a un plano de fractura intersectando el agujero como se ilustra en la fig. 4.1b. Las bandas verticales oscuras separadas aproximadamente  $180^\circ$  corresponden a unas reflexiones de baja amplitud que provienen de ovalidades mostradas en la fig. 4.1d. (b) Un plano de fractura intersectando el agujero produce una banda oscura sinusoidal en el registro de reflectividad. (c) Fotografía de un registro del osciloscopio que muestra como el tiempo de viaje como función del azimut es determinado para una simple rotación del transductor acústico a una profundidad de cerca de 797 m. 600 pulsos acústicos reflejados (una rotación del transductor) son desplegadas lado por lado como una función del azimut con la amplitud de la intensidad de la reflexión de la amplitud modulada. (d) Forma del agujero correspondiente a los datos mostrados en la fig. 4.1c. Las ovalidades tienen aproximadamente  $35^\circ$  de amplitud y alarga el radio del agujero cerca de 15 mm.<sup>32</sup>

La fig. 4.2 muestra bandas oscuras verticales en lados opuestos del agujero, con bordes irregulares y afilados (fig. 4.2a). Se pueden observar estas características en sección transversal procesando los datos del registro televiwer a tiempo de viaje (fig. 4.2b).

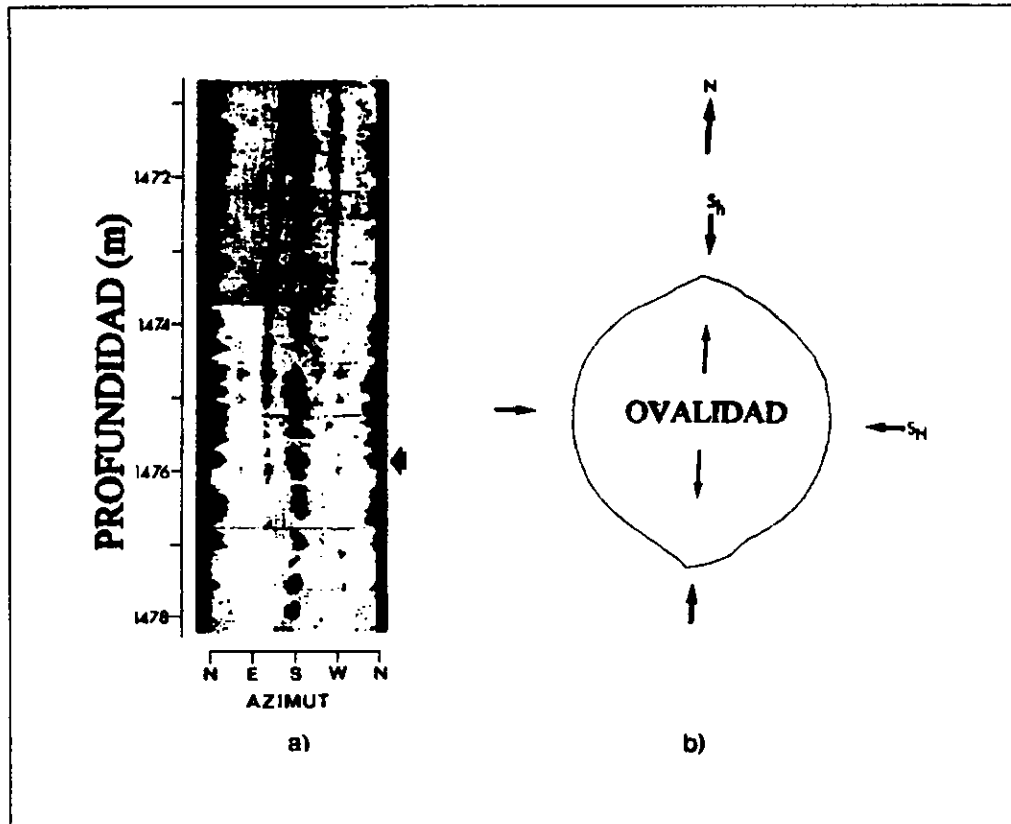


Fig. 4.2 a) Sección de un registro televiwer de un pozo en Auburn que muestra zonas del agujero con elongaciones u ovalidades (bandas oscuras) y b) Sección transversal de una ovalidad a 1475.8 m (flecha en la fig. A). También se muestra la orientación de los principales esfuerzos horizontales, determinados de pruebas de fracturamiento hidráulico en este pozo.<sup>11</sup>

La figura 4.3 muestra ovalidades en arenas del paleoceno a diferentes profundidades en el pozo Auburn, las figuras 4.4 y 4.5 muestran ovalidades observadas en rocas graníticas y toba respectivamente. La figura 4.3c muestra ovalidades amplias y achatadas en el fondo similares a las de la fig. 4.1. Sin embargo ovalidades más profundas también se presentaron en este pozo (figuras 4.3a y 4.3b).

La figura 4.4 muestra ovalidades en un pozo perforado en roca granítica al sur de Carolina. Aunque las ovalidades son algo irregulares en los pozos, son básicamente amplias y de fondo chato como en la figura 4.3c.

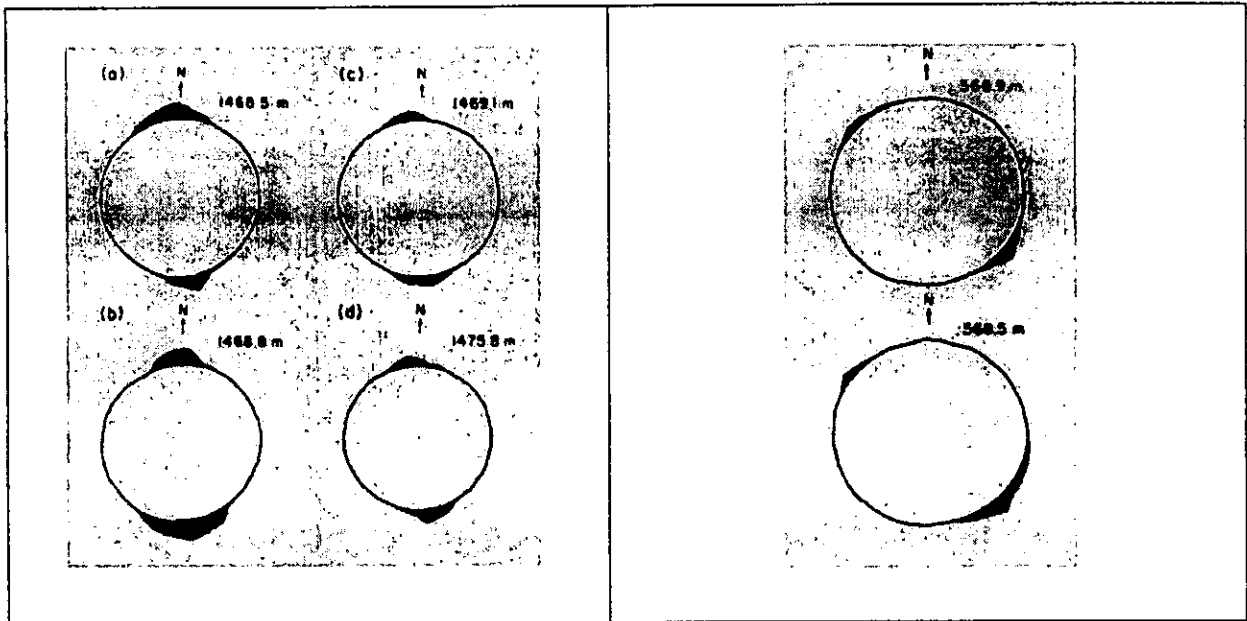


Fig. 4.3 Ovalidades representativas en un pozo en Auburn, New York, el área sombreada representa la diferencia entre la forma observada del agujero y el diámetro nominal del mismo.<sup>32</sup>

Fig. 4.4 Ovalidades representativas en granito del pozo Monticello 2 cerca de Monticello, sur de Carolina.<sup>32</sup>

La figura 4.5 muestra ovalidades en dos pozos perforados en toba en Nevada, en estos pozos las formas de ovalidades varían de amplias y achatadas en el fondo (figuras 4.5a y 4.5d) a profundas. Nótese que las ovalidades menos profundas no son apreciablemente más amplias que las ovalidades menos profundas.



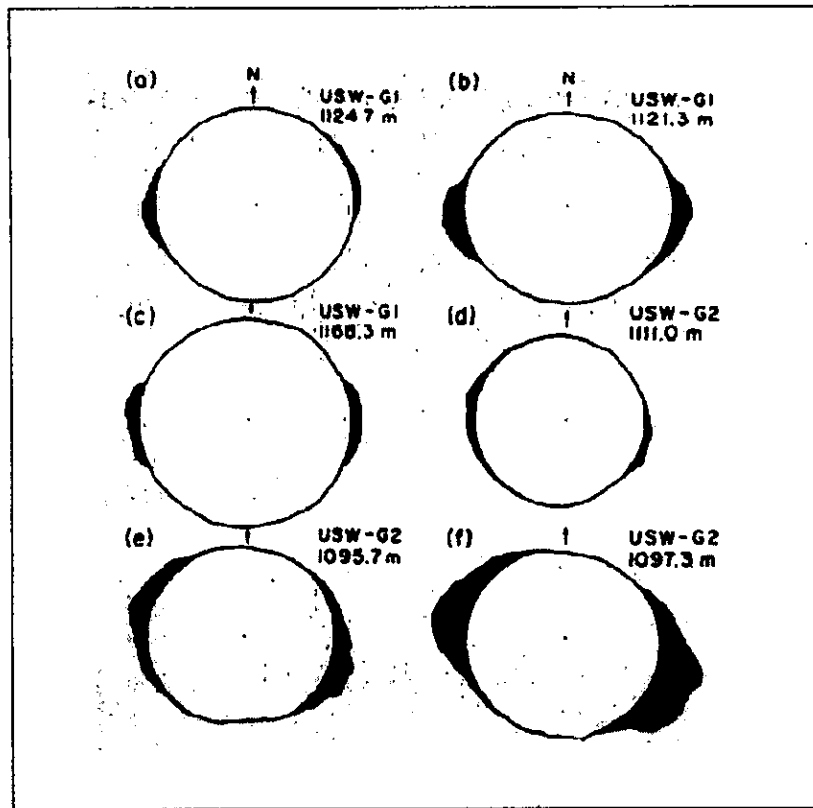


Fig. 4.5 Ovalidades representativas en tobas, de pozos perforados en Nevada.<sup>32</sup>

Las evidencias presentadas en las figuras 4.1 a 4.5 mostraron que las ovalidades estaban alineadas con la dirección local de la menor compresión horizontal. Hickman<sup>12</sup> demostró que las ovalidades en Auburn eran perpendiculares a la orientación de las fracturas hidráulicas en el mismo pozo (fig. 4.6 y 4.7); Stock<sup>32</sup> encontró evidencia similar en los pozos de Nevada; Hickman y Zoback<sup>12</sup> mostraron que las ovalidades de Monticello indican la dirección de la máxima compresión horizontal. Sin embargo los ejemplos sugieren que la mayoría de las ovalidades son amplias y de fondo achatado, a diferencia de la forma de oreja alargada precedida por Gough y Bell<sup>32</sup>.

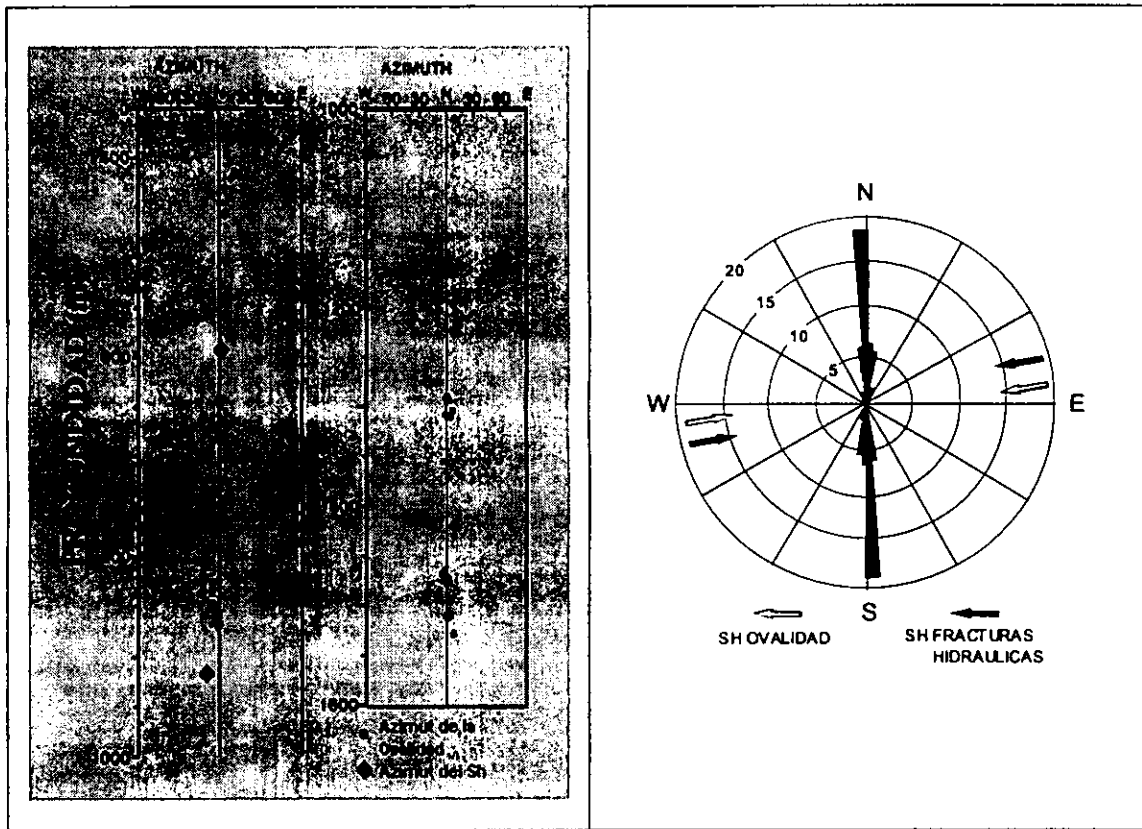


Fig. 4.6 Variación del azimut de la ovalidad en función de la profundidad para un pozo en Auburn determinado con el registro televiever. Se muestra el azimut de Sh a 593 y 919 m determinado con pruebas de fracturamiento hidráulico.<sup>11</sup>

Fig. 4.7 Diagrama que muestra la longitud total de ovalidades en un pozo en Auburn determinada con el registro televiever. También se muestra el azimut de SH inferido de estas ovalidades junto con el azimut de SH medido con pruebas de fracturamiento hidráulico.<sup>11</sup>

## 4.2 Mecanismos de formación de una ovalidad

Para una placa elástica con un agujero cilíndrico, homogénea e isotrópica sujeta a un esfuerzo mínimo y un esfuerzo máximo (Sh y SH), las siguientes ecuaciones aplicadas por Kirsch en 1898 y Jaeger<sup>14</sup> en 1961, describen el estado de esfuerzos;

$$\sigma = 0.5(SH + Sh)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + 0.5(SH - Sh)\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\sigma_{\theta} = 0.5(SH + Sh)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - 0.5(SH - Sh)\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\tau_{\theta r} = -0.5(SH + Sh)\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \dots\dots\dots(4.3)$$

donde  $\sigma_r$  es el esfuerzo radial,  $\sigma_{\theta}$  el esfuerzo circunferencial,  $\tau_{\theta r}$  el esfuerzo tangencial,  $R$  el radio del agujero,  $r$  el radio alargado por la ovalidad,  $\theta$  el azimut medido a partir de la dirección de  $SH$  y  $\Delta P$  la diferencia entre la presión del fluido y la presión de la formación (si es positivo indica un exceso de presión en el agujero). En la figura 4.8a se muestra la superficie de ruptura de una roca al estar sometida a un esfuerzo compresivo  $SH$ . Lejos de la pared del pozo, estas superficies de falla son planos orientados a determinado ángulo de  $SH$  controlado por el coeficiente de fricción. Cerca de la pared del pozo la concentración de esfuerzos resulta en marcadas superficies potenciales de falla. Esto es el resultado de la rotación de azimuts de los principales esfuerzos máximo y mínimo cerca de la superficie libre del agujero cilíndrico. Es importante notar que la magnitud de los esfuerzos de corte y normales efectivos a lo largo de las superficies potenciales de falla varía en función de  $r$  y  $\theta$ . La región donde la falla compresiva se espera que ocurra puede ser anticipada con el criterio de Griffith de McClintock y Walsh<sup>32</sup> (1962). Este criterio considera la extensión de agrietamiento o fallamiento el cual tiene una resistencia friccional finita en un campo de esfuerzos biaxiales. En este contexto, las superficies potenciales de falla son agrietamientos con un coeficiente de deslizamiento friccional  $\mu$  sujeto a esfuerzos cortantes y esfuerzos efectivos normales. Como lo discutido por Paterson (1978) y Jaeger y Cook<sup>13</sup> (1979), el análisis de McClintock y Walsh<sup>32</sup> (1962) es equivalente al criterio de Coulomb en el cual la envolvente de falla tiene una pendiente igual al coeficiente de deslizamiento friccional  $\mu$ , y una intersección igual a la resistencia cohesiva de la roca  $\tau_0$ . La región alrededor del agujero en la cual se espera que falle puede ser calculada en términos del círculo de Mohr. La ruptura puede ocurrir donde el radio del círculo de Mohr  $\left[\left(\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{\theta r}^2\right]^{1/2}$  es mayor o igual a la distancia desde el centro del círculo a la línea de falla dada por  $[\mu/(1+\mu^2)^{1/2}][\sigma_{\theta} + (\sigma_{\theta} + \sigma_r)/2]$ . Para calcular el tamaño y forma de la región alrededor del agujero donde se espera la ruptura bajo determinados esfuerzos in-situ, se puede expresar reorganizando las expresiones anteriores. De acuerdo al criterio de Navier Coulomb  $\sigma_r = \tau_0 - \mu\sigma_{\theta}$ , el valor máximo de resistencia cohesiva a la cual se presenta la ruptura del material está dado por:

$$\tau_0 = (1 + \mu^2)^{1/2} \left( \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau r \theta^2 \right)^{1/2} - \mu \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \dots \dots \dots (4.4)$$

Para la mayoría de las rocas  $\mu$  varia de 0.6 a 1.0 (Byerlee<sup>4</sup>, 1978), mientras que  $\tau_0$  puede variar hasta decenas de megapascales. Si sustituimos apropiadamente valores en las ecuaciones anteriores, podemos predecir el tamaño de la región inicial en la cual la relación de esfuerzo de corte y los esfuerzos normales son lo suficientemente grandes para causar la ruptura. La fig. 4.8b muestra el tamaño de la región en la cual los esfuerzos exceden la resistencia de la roca, para  $\Delta P=0$  y un valor nominal de  $\tau_0=12.5$  MPa.

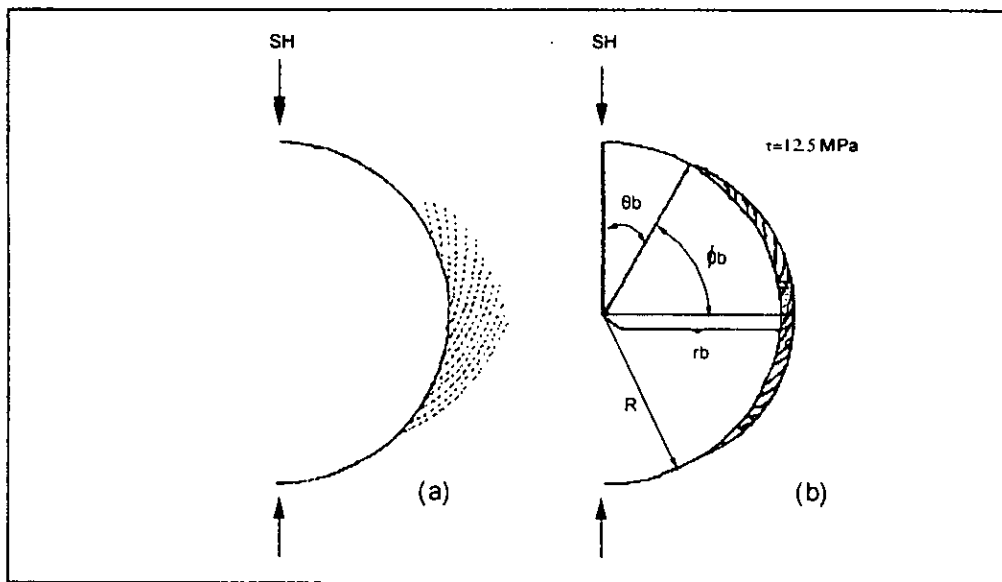


Fig. 4.8 a) Orientación de las superficies potenciales de falla. b) Area en la que se espera la ovalidad.<sup>32</sup>

La figura 4.9 muestra otros ejemplos para diferentes valores de esfuerzos y coeficientes de fricción. Estas figuras muestran que las formas de las ovalidades son amplias y achatadas en el fondo. Para valores dados de  $Sh$ ,  $SH$  y  $\mu$  a menor resistencia cohesiva de la roca, es mas amplia y profunda la región de la ovalidad. Por ejemplo,

en el caso donde  $Sh=10$  MPa,  $SH=15$  MPa y  $\mu=0.5$ , no se observa ovalidad en el agujero perforado en una roca con resistencia cohesiva mayor a 10 MPa. Sin embargo, si la resistencia cohesiva es menor de 6 MPa, la ovalidad será tan larga como para extenderse alrededor del agujero. En dicha figura no se muestran tamaños de ovalidades para valores pequeños de  $\tau_0$  debido a que la relación de esfuerzos horizontales se incrementa de tal forma que la ovalidad se hace tan grande como para invalidar el análisis.

Como se puede ver en la figura 4.9 el efecto del incremento de la relación de esfuerzos horizontales es el de hacer las ovalidades más grandes para determinados valores de  $\mu$  y  $\tau_0$ . Similarmente, para determinada relación de esfuerzos y  $\tau_0$ , y valores grandes de  $\mu$  resultan ovalidades mucho menores.

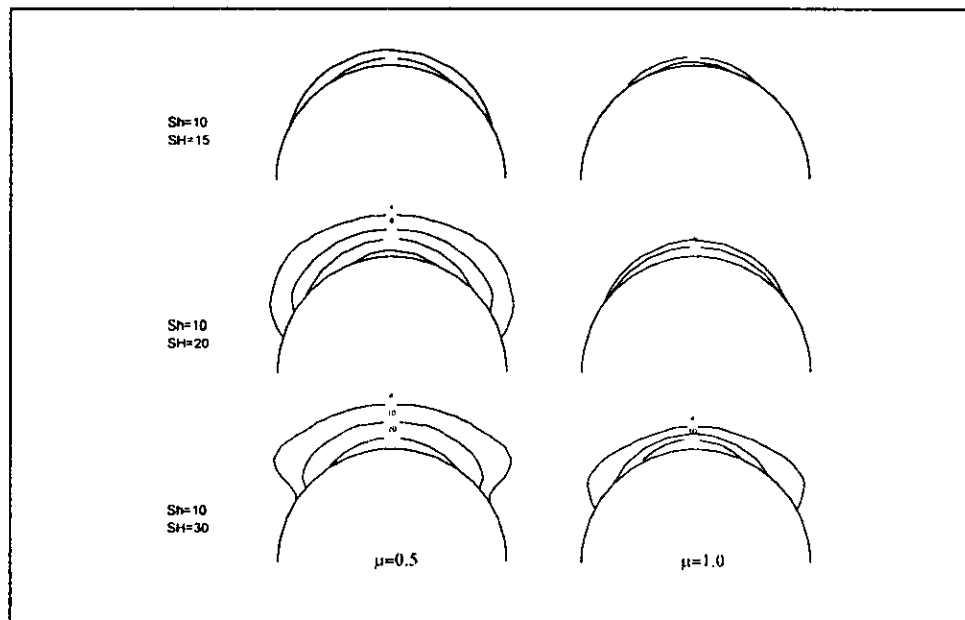


Fig. 4.9 Tamaños teóricos de ovalidades al ser sometidos a diferentes concentraciones de esfuerzos.<sup>32</sup>

Las ovalidades amplias y de fondo plano mostradas en la fig. 4.9 son mucho más similares a las ovalidades mostradas en las figuras 4.3-4.5, que las ovalidades en forma de orejas puntiagudas sugeridas por Bell y Gough. Cabe señalar que el análisis presentado hasta aquí considera solamente la formación de las ovalidades en un agujero inicialmente cilíndrico. Una posible explicación de las ovalidades mas profundas e irregulares como las mostradas en las figuras 4.3 a 4.5, es que las ovalidades continúan creciendo después de su formación inicial.

En general el tamaño inicial de las ovalidades es función de la resistencia cohesiva de la roca, el coeficiente de fricción y magnitud de los esfuerzos principales por conveniencia se supone que  $SH \leq 3Sh$ , lo cual es común en la mayoría de los casos in-situ, y también se supone que no existe exceso de presión de fluido en el pozo ( $\Delta P = 0$ ). Sustituyendo las ecuaciones 4.1-4.3 en 4.4, podemos expresar la resistencia cohesiva en el punto donde la ovalidad intersecta el agujero  $\tau_o(R, \theta_b)$ , y la resistencia cohesiva en el punto mas profundo de la ovalidad  $\tau_o(rb, \pi/2)$  como:

$$\tau_o(R, \theta_b) = \frac{1}{2} (aSH + bSh) \dots \dots \dots (4.5)$$

$$\tau_o(rb, \pi / 2) = \frac{1}{2} (cSH + dSh) \dots \dots \dots (4.6)$$

donde:

$$a = [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] (1 - 2 \cos 2\theta_B)$$

$$b = [(1+\mu^2)^{1/2} - \mu] (1 + 2 \cos 2\theta_B)$$

$$c = -\mu + (1 + \mu^2)^{1/2} - \frac{R^2}{rb^2} [(1 + \mu^2)^{1/2} - 2\mu] + \frac{3R^4}{rb^4} (1 + \mu^2)^{1/2}$$

$$d = -\mu - (1 + \mu^2)^{1/2} + \frac{3R^2}{rb^2} [(1 + \mu^2)^{1/2} + 2\mu] - \frac{3R^4}{rb^4} (1 + \mu^2)^{1/2}$$

Si suponemos que la ovalidad sigue una trayectoria a lo largo del valor dado de  $\tau_0$  como se muestra en la figura 4.9, entonces:

$$\tau_0(R, \theta_b) = (rb, \pi/2) \dots \dots \dots (4.8)$$

$$Sh = 2\tau_0 \left( \frac{a-c}{ad-bc} \right) \dots \dots \dots (4.9)$$

$$SH = 2\tau_0 \left( \frac{d-b}{ad-bc} \right) \dots \dots \dots (4.10)$$

$$\frac{SH}{Sh} = \left( \frac{d-b}{a-c} \right) \dots \dots \dots (4.11)$$

La figura 4.10 muestra la relación SH/Sh, la cual es independiente de  $\tau_0$ , como función de  $rb/R$  y  $\phi_b$  (donde  $\phi_b = \pi/2 - \theta_b$ , ver fig. 4.8b) para  $\mu=0.6$ . Como se esperaba, solo un pequeño fracturamiento ocurrirá cuando los dos esfuerzos horizontales sean aproximadamente iguales. Como se puede ver las ovalidades se vuelven mas profundas y mas amplias al incrementarse la relación SH/Sh, aun para altas relaciones de esfuerzos, el radio del pozo se incrementa solamente 15% cuando  $\phi_b$  es tan grande como 50°. Es claro entonces, que aunque esta simple teoría puede explicar las ovalidades amplias y de fondo plano observadas en las figuras 4.3-4.5, no puede explicar las ovalidades mas profundas.

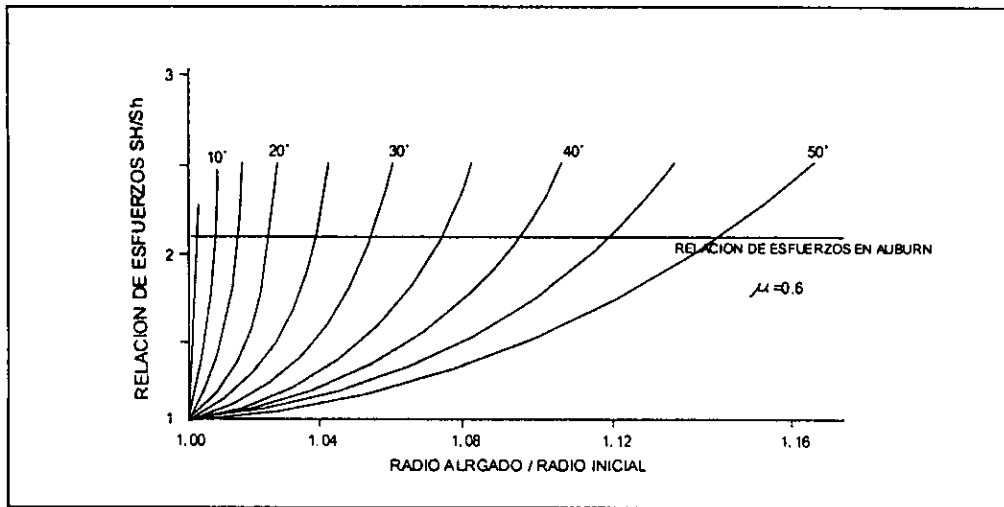


Fig. 4.10 Relación entre la máxima profundidad, amplitud y relación de esfuerzos de ovalidades. Las curvas corresponden a ovalidades con varios valores de  $\phi_b$ , donde  $\mu=0.6$  y  $\Delta P=0$ . Ejemplo de un pozo en Auburn, New York.<sup>32</sup>

### 4.2.1 Efecto del fluido en el pozo en una ovalidad

La figura 4.11 muestra el efecto de la diferencia entre la presión del fluido en el pozo y en la formación, para  $SH=22$  MPa,  $Sh=11$  MPa y  $\mu=0.6$ . Si se incrementa la presión del pozo a 2.5 MPa (fig. 4.11b), el tamaño de la ovalidad se ve substancialmente disminuida. Por otro lado un decremento en  $\Delta P$  en la misma proporción (fig. 4.11c) promueve un marcado desarrollo de la ovalidad. La fuerte influencia de  $\Delta P$  en el tamaño y forma de la ovalidad es debido al cambio en el esfuerzo normal en planos potenciales de falla cerca del agujero. Un  $\Delta P$  positivo incrementa los esfuerzos normales en dichos planos inhibiendo la falla. Un ejemplo práctico del principio ilustrado en la figura 4.11 es la práctica común de usar aditivos densificantes en los lodos de perforación (barita) para estabilizar los agujeros en formaciones con baja resistencia cohesiva. El lodo incrementa  $\Delta P$ , y la ovalización del agujero es minimizada.



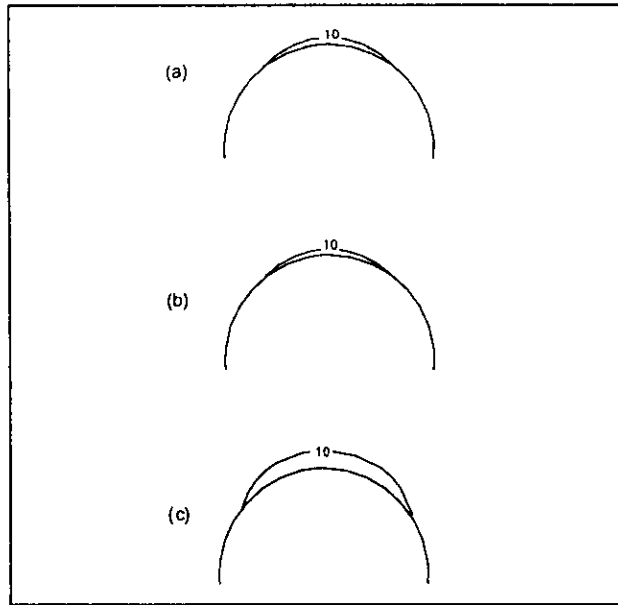


Fig. 4.11 Efecto del exceso de presión en el pozo en el tamaño de la ovalidad. a) La presión en el pozo es igual a la de la formación ( $\Delta P=0$ ). b) La presión en el pozo es mayor que en la formación ( $\Delta P=2.5$  MPa). c) La presión en el pozo es menor que en la formación ( $\Delta P=-2.5$  MPa).<sup>32</sup>

## 4.2.2 Fricción de las rocas

El estudio de la fricción es de gran importancia en mecánica de rocas. Sus efectos están en todas las escalas: 1) a escala microscópica, en la cual la fricción se considera entre superficies opuestas en diminutas fracturas, 2) a mayor escala, en la cual la fricción ocurre entre granos individuales. 3) a gran escala donde la fricción actúa en superficies de falla en las cuales las áreas en cuestión pueden variar de pocos a varios pies cuadrados.

Suponiendo que dos cuerpos con una superficie de contacto aproximadamente plana de área aparente  $A$  son presionados juntos con una fuerza  $W$  normal al plano de contacto, y una fuerza  $F$  paralela a la superficie de contacto necesaria para iniciar el deslizamiento. La relación entre  $F$  y  $W$  se puede escribir

$$F = \mu W,$$

donde  $\mu$  es llamado coeficiente de fricción,  $\mu$  depende de la naturaleza del material y del estado de las superficies de contacto. Experimentalmente se ha comprobado que  $\mu$  es independiente de A y W. Dividiendo la ecuación anterior entre A se tiene:

$$\tau = \mu\sigma,$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo normal a través de las superficies en contacto y  $\tau$  es el esfuerzo de corte necesario para iniciar el deslizamiento.

La tabla 4.1 muestra diversos coeficientes de fricción para rocas y minerales.

Mineral	$\mu$	Mineral	$\mu$
NaCl (B;s)	0.7	Cuarzo (HD)	0.11
PbS (B;s)	0.6	Cuarzo (P)	0.19
S (B;s)	0.5	Feldespato (HD)	0.11
Vidrio (B;s)	0.7	Calcita (HD)	0.14
Diamante (B;s)	0.1	Muscovita (H, D)	0.43
Diamante (B;s;c)	0.3	Talco (HD)	0.36

Roca	$\mu$	Roca	$\mu$
Arena (R)	0.68	Dolomita (HS;t;g)	0.4
Arena (J;t;n)	0.52	Dolerita (W;t;g)	0.64
Arena (H;l;r)	0.51	Dolerita (W;t;n)	0.95
Arena (H;l;r;w)	0.61	Marmol (H;l;p)	0.75
Granito (By;t;n;g)	0.60	Marmol (J;t;n)	0.62
Granito (By;t;n;g;w)	0.60	Gneiss (J;t;n)	0.71

Granito (H;l;g)	0.64	Gneiss (J;t;n;w)	0.61
Cuarzita (W;t;g)	0.48	Gabro (H;l;p)	0.18
Cuarzita (W;t;n)	0.67	Gabro (H;l;g)	0.66

Tabla 4.1 Coeficientes de fricción de rocas y minerales

Notación: Autores. B, Bowden y Tabor (1950, 1964); By, Byerlee (1967); H, Hoskins (1968); HS, Handin y Stearns (1964); HD, Horn y Deere (1962); J, Jaeger (1959); P, Penman (1953); R, Rae (1963); W, Wiebols (1968). L, superficie larga; s, superficie pequeña; t, prueba triaxial; r, superficie rugosa; g, superficie de tierra gruesa; p, superficie de tierra fina; n, superficie natural; w, superficie mojada; c, superficie limpia.<sup>13</sup>

### 4.3 Detección de una ovalidad

Las ovalidades se pueden detectar principalmente con el análisis del registro de echados de cuatro brazos. Esta herramienta va girando al ir la sacando del pozo mientras toma la resistividad de la roca, cuando una zona con ovalidades es encontrada, los pares opuestos de calibradores en el registro se extienden diferente, grabando diferentes diámetros del agujero. La herramienta para de rotar al mismo tiempo debido a que los patines se clavan temporalmente en el surco, por lo que se obtiene la lectura de un azimut constante. Este es usado para medir el azimut de la elongación que corresponde a la dirección de  $S_h$ , y siguiendo la interpretación comentada con anterioridad, SH será directamente perpendicular a  $S_h$ .

El alargamiento del agujero puede tener diversas causas además de los esfuerzos, el agujero se puede lavar debido a la erosión de un material poco consolidado, la pared del agujero puede fallar debido a la intersección de una o mas fracturas preexistentes, o el agujero también puede elongarse debido a que la tubería se recargue en la pared del pozo. Uno o ambos calibradores también pueden mostrar un diámetro menor al de la barrena debido al enjarre del lodo. La figura 4.12 muestra algunos ejemplos relacionados con las condiciones del agujero.

En el caso de agujero lavado, ambos calibradores se alargan, pero no siempre en el mismo grado.

El registro de echados generalmente responde a fracturas en forma diferente que en las ovalidades o agujeros lavados, por lo que ha sido utilizado con éxito como una herramienta para identificar fracturas en rocas de baja porosidad. La respuesta que se tiene en las fracturas es generalmente una amplitud mayor que en la ovalidad, además de que una mayor conductividad indicaría una posible fractura. Cualquier anomalía que involucre patines adyacentes en vez de opuestos es también un indicador de fractura o de que la herramienta no está bien centrada en el agujero, por lo que este tipo de anomalías se deben de descartar para no evaluarlas como ovalidades.

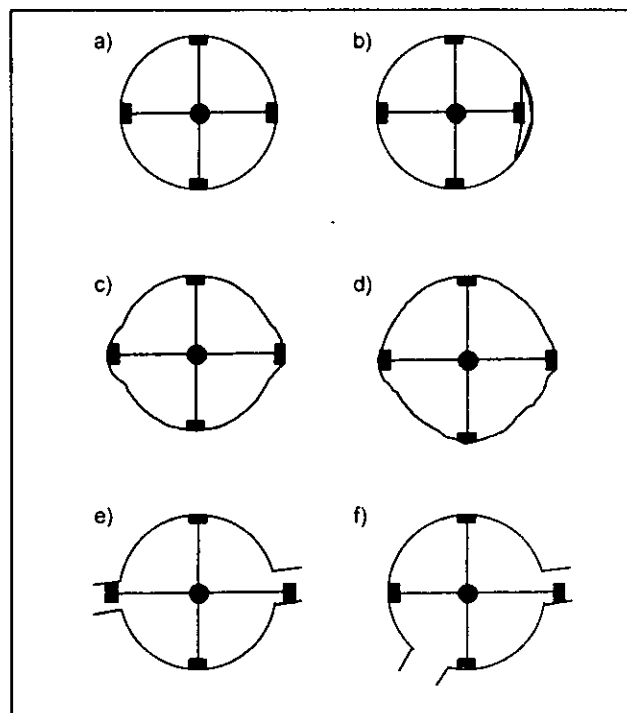


Fig. 4.12 Configuraciones del agujero para diferentes condiciones. a) agujero dentro del calibre, b) uno de los calibradores es menor debido a enjarre de lodo, c) ovalidad, un calibrador es mayor al otro, d) agujero lavado, ambos diámetros son mayores que el del agujero, e) fractura intersectando al agujero, f) fractura intersectando al agujero, pero no a lo largo de su eje. <sup>26</sup>

Los criterios para identificar ovalidades a partir del registro de echados son:

1. La herramienta debe de dejar de rotar.
2. No debe existir un incremento exagerado en la conductividad a menos que involucre todos los patines.
3. No debe existir anomalías en la conductividad en que se involucre solo uno o dos patines adyacentes.
4. El caliper mayor debe ser mas grande que el diámetro de la barrena, y el caliper menor no debe ser significativamente menor al diámetro de la barrena, además este caliper debe permanecer constante.
5. El diámetro mayor debe mostrar un cambio repentino mas que un incremento gradual.
6. La dirección de la elongación no debe seguir el azimut de la desviación del agujero.

Las ovalidades tienden a tener formas irregulares y son desiguales en apariencia, así que estos criterios probablemente eliminaran zonas que no son ovalidades.

Existen diversos parámetros que controlan la forma y el tamaño de una ovalidad:

1. Litología, fabrica y resistencia- La litología y la resistencia obviamente controlan la formación de la ovalidad, ya que para que una ovalidad se pueda formar la resistencia de la roca deberá ser excedida. Guenot<sup>21</sup> (1990) observo que la lutita, carbón, carbonatos y rocas metamórficas a altas presiones son las rocas mas susceptibles a fallar. Trabajos experimentales de Santarelli<sup>21</sup> en 1989 y Addis<sup>21</sup> en 1990 mostraron que rocas de diferente tipo o diferente resistencia producen diferentes formas de ovalidades. Algunas observaciones mostraron anomalías en la orientación

de las ovalidades asociadas con cambios en la litología (Allison y Nielson<sup>32</sup> 1978), y cementación (Laubach 1978).

2. Régimen de esfuerzo- La relación entre los tres principales esfuerzos regionales actuando en un pozo dependen del marco geológico del área. Se sabe que las ovalidades ocurren en diferente régimen de esfuerzos, variando de compresional a extensional.

El rol del esfuerzo vertical y la profundidad no ha sido bien entendido. Observaciones geológicas han mostrado que las ovalidades tienden a incrementarse con frecuencia con la profundidad. Esto está apoyado por experimentos en laboratorio (Maloney y Kaiser<sup>18</sup> 1989) y estudios teóricos (Zoback y colaboradores<sup>32</sup> 1986), ambos relacionan mayores esfuerzos a mayor profundidad. La profundidad probablemente no sea independiente de los esfuerzos horizontales para la formación de una ovalidad. Zoback (1985) modeló las ovalidades usando el criterio de Mohr Coulomb y sugirió que el contraste de esfuerzos horizontales es un parámetro importante que controla su forma y tamaño.

3. Desviación y orientación del agujero- Los esfuerzos actuando en un agujero pueden depender tremendamente de la desviación de un pozo. Esto provoca que diversos factores adicionales se tomen en cuenta, tales como ángulo de desviación del pozo y orientación del mismo con respecto a los esfuerzos horizontales.

Bradley<sup>32</sup> (1979) mostró que la desviación del pozo reduce la estabilidad del mismo. Aadnoy<sup>32</sup> (1978) encontró que si el pozo es paralelo a la dirección del mínimo esfuerzo horizontal, es más estable que si está en una dirección paralela al máximo

esfuerzo horizontal. También que si los esfuerzos horizontales están a un ángulo de  $10-35^\circ$  causa colapso para rocas laminadas. McLean<sup>7</sup> (1988) demostró teóricamente resultados similares. Es por esto que diversos autores prefieren ignorar los pozos desviados a ángulos mayores de  $5-10^\circ$ .

Otros parámetros que influyen en la formación de ovalidades son las fracturas, presión de poro y temperatura.

## **5. Desarrollo de un Programa de Cómputo que Permite Conocer Zonas con Ovalidad en el Pozo**

### **5.1 Elementos básicos para el análisis de un pozo**

El primer punto a considerar en un pozo al que se le quiera aplicar el programa de cómputo es que este sea lo más vertical posible, esto es debido a que en el programa no se consideró ningún ángulo de inclinación en el pozo, como es obvio el estado de esfuerzos no cambia, pero si su efecto en el agujero si este tiene una determinada inclinación, ya que los esfuerzos horizontales estarían actuando en las paredes del pozo a un determinado ángulo de este y con esto el efecto en la ovalidad del agujero cambiaría.

El segundo punto a considerar es en cuanto a los registros que se necesitan, básicamente solo se requieren de dos curvas calibradoras, cualquier registro que cuente con dichas curvas acompañadas de su respectiva profundidad debe de servir para efectuar el análisis de ovalidad, actualmente existen diversas herramientas que entre sus objetivos precisamente uno es medir dos diámetros del agujero, estas herramientas cuentan con cuatro brazos y comúnmente sirven para tomar resistividades como el HDT y SHDT o los de imágenes como el FMI por mencionar algunos ya que cada compañía tiene un nombre diferente aunque lo que mide es similar. Es importante mencionar que comúnmente uno de los cuatro patines esta orientado, es decir que siempre conocemos el azimut de dicho patín (patín número uno), con esto sabemos perfectamente la posición de cada patín en todo momento ya que están separados uno del otro 90°.



El registro del pozo que se requiera analizar debe estar digitizado en código ASCII; más adelante se mencionará el formato u orden en que el programa necesita la entrada de datos.

El tercer punto a considerar que aunque no tan importante como los anteriores es que se cuente con información adicional del pozo como su informe final, diámetro de barrenas que se utilizaron en cada etapa, problemas que se tuvieron durante la perforación, esto con el fin de conocer los procesos por los que pasó el pozo de tal forma que el resultado que del programa este apoyado de alguna forma con lo observado durante la perforación.

## **5.2 Funcionamiento del Programa**

El programa se elaboró en lenguaje BASIC y debe de correr en cualquier computadora personal 386 o mayor. La capacidad de análisis del volumen de datos depende de la capacidad de la computadora.

La primera parte del programa es la entrada de datos: nombre del archivo donde están los datos del registro o pozo que se va a analizar así como el nombre del archivo de salida, que es el archivo al que se van a mandar los resultados.

Los datos deben encontrarse como ya se menciona en código ASCII en el siguiente orden:

Profundidad    Azimut del patín 1    Calibrador 1    Calibrador 2

Posteriormente el programa requiere el número de datos que se van a manejar y el diámetro de barrena con que se perforó la etapa del registro a analizar.

En la siguiente parte el programa clasifica entre ovalidad o no ovalidad para cada punto del registro, esto se hace de la forma siguiente; diversos autores hacen hincapié en la diferenciación de una ovalidad (key seat (ver fig.5.1)), es decir, para que una diferencia de diámetros deba considerarse como ovalidad, se usó el siguiente criterio:

- 1) La rotación de la herramienta se detiene en la zona elongada
- 2) La diferencia de diámetros es mayor a 0.6 cm (0.23622 pg)
- 3) La longitud (continua) con una diferencia de diámetros de 0.6 cm debe ser mayor a 30 cm

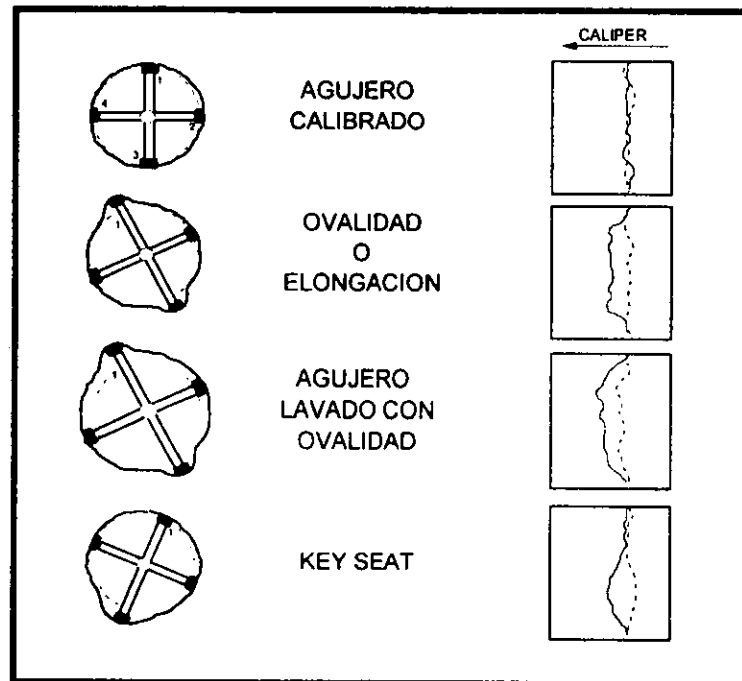


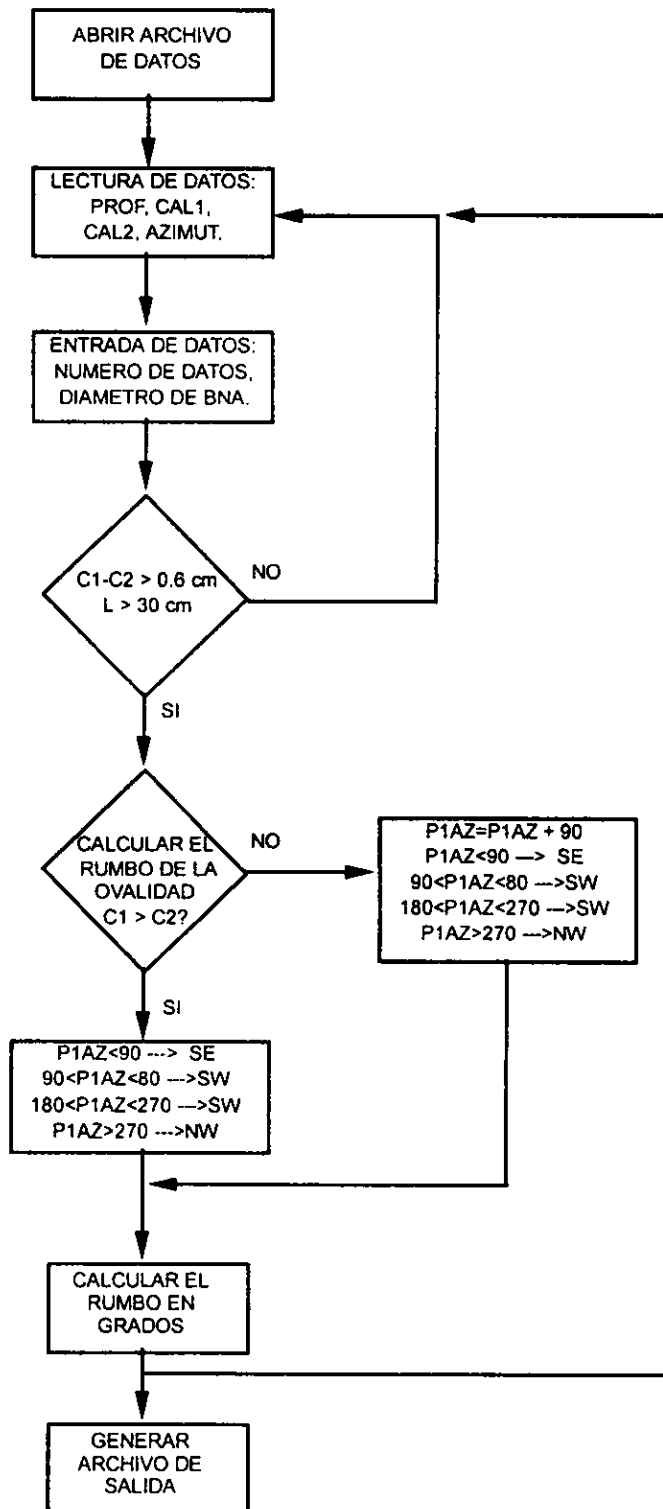
Fig. 5.1 Ejemplos de registros de calibración y la común interpretación de la geometría del agujero.<sup>25</sup>

El programa continúa con el cálculo para el rumbo de la ovalidad, para esto se toma en cuenta que el patín número uno cuenta con orientación.

Por último el programa cuenta con la salida de resultados, esta se manda al archivo ya antes mencionado, que se puede desplegar y graficar con cualquier programa ya que esta en código ASCII. El formato de salida es el siguiente:

Profundidad    Azimut del patín 1    Calibrador 1    Calibrador 2    Ovalidad    Rumbo

### 5.3 Diagrama de flujo



## 5.4. Programa de cómputo

```
' UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
' DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
' FACULTAD DE INGENIERIA

' PROGRAMA PARA LOCALIZAR ZONAS CON OVALIDAD

' AUTOR: ING. CUAUHTEMOC SOTO SANCHEZ
' DIRECTOR: DR. DANIEL GARCIA GAVITO
```

```
CLS
DIM PROF(10000)

' APERTURA DE ARCHIVO DE DATOS
OPEN "C:/EMO/TESIS/NIX1.DAT" FOR INPUT AS #1
OPEN "C:/EMO/TESIS/OVAL.DAT" FOR OUTPUT AS #2

' ENTRADA DE DATOS
INPUT "NUMERO DE DATOS"; D
INPUT "DIAMETRO DE BARRENA"; B

' FORMATO DE SALIDA
WRITE #2, "PROF", "P1AZ", "C1", "C2", "OVAL", "RBO", " --"

' INICIO DE CICLO
SUMA = 0
FOR I = 1 TO D
INPUT #1, PROF, P1AZ, C1, C2

' CONDICIONES PARA QUE EXISTA OVALIDAD
DIF = ABS(C1 - C2)
IF DIF > .23622 THEN CON = 1 ELSE CON = 0
PROF(I) = PROF
IF CON = 1 THEN
```

```
DIF2 = PROF(I) - PROF(I - 1)
SUMA = SUMA + DIF2
IF SUMA >= .3 THEN OVAL = 1 ELSE OVAL = 0
ELSE
SUMA = 0
OVAL = 0
END IF
```

' RUMBO DE LA OVALIDAD CUANDO C1>C2

```
IF C1 >= C2 THEN
IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN RBO$ = "NE"
IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO$ = "SE"
IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO$ = "SW"
IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO$ = "NW"
END IF
```

' RUMBO DE LA OVALIDAD CUANDO C2>C1

```
IF C2 > C1 THEN
P1AZ = P1AZ + 90
IF P1AZ > 360 THEN P1AZ = P1AZ - 360
IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN RBO$ = "NE"
IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO$ = "SE"
IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO$ = "SW"
IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO$ = "NW"
END IF
```

' CALCULO DEL RUMBO EN GRADOS

```
IF P1AZ < 90 THEN RBO = P1AZ
IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO = 180 - P1AZ
IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO = P1AZ - 180
IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO = 360 - P1AZ
```

```
IF C2 > C1 THEN
```

```
IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN P1AZ = P1AZ + 270 ELSE P1AZ = P1AZ
```

- 90

```
END IF
```

```
' SALIDA DE RESULTADOS  
  WRITE #2, PROF, P1AZ, C1, C2, OVAL, RBO, RBO$  
NEXT I  
  CLOSE #1  
  CLOSE #2  
END
```

## 5.5. Ejemplo de aplicación

Como ya se mencionó anteriormente un pozo candidato para la aplicación del programa puede ser cualquiera que sea vertical y que cuente con un registro de caliper de cuatro brazos, desafortunadamente no se acostumbra tomar en todo el desarrollo del pozo un registro calibrador de cuatro brazos, debido a su costo éste sólo se toma en las zonas de interés o con posibilidad de producción, siendo en los pozos exploratorios donde se dispone de mayor información de este tipo.

Para verificar el funcionamiento del programa se seleccionó el pozo Nix-1, pozo exploratorio de la región marina perforado en 1996 que resultó invadido de agua salada.

Se cuenta con un archivo ASCII de un registro de echados (HDT) que va de 1760.28 a 2149.77 m con un total de 4794 datos, esta etapa se perforó con una barrena 14 3/4".

La gráfica 5.1 muestra el registro de caliper y su respectivo azimut para el pozo Nix-1, como se puede observar el azimut permanece constante casi en la totalidad del pozo, esto es debido como ya se mencionó a que el patín de la herramienta tiende a

permanecer sin girar en zonas con elongación. En cuanto al caliper, se observa que existe una separación muy visible a partir de 1910 m aproximadamente.

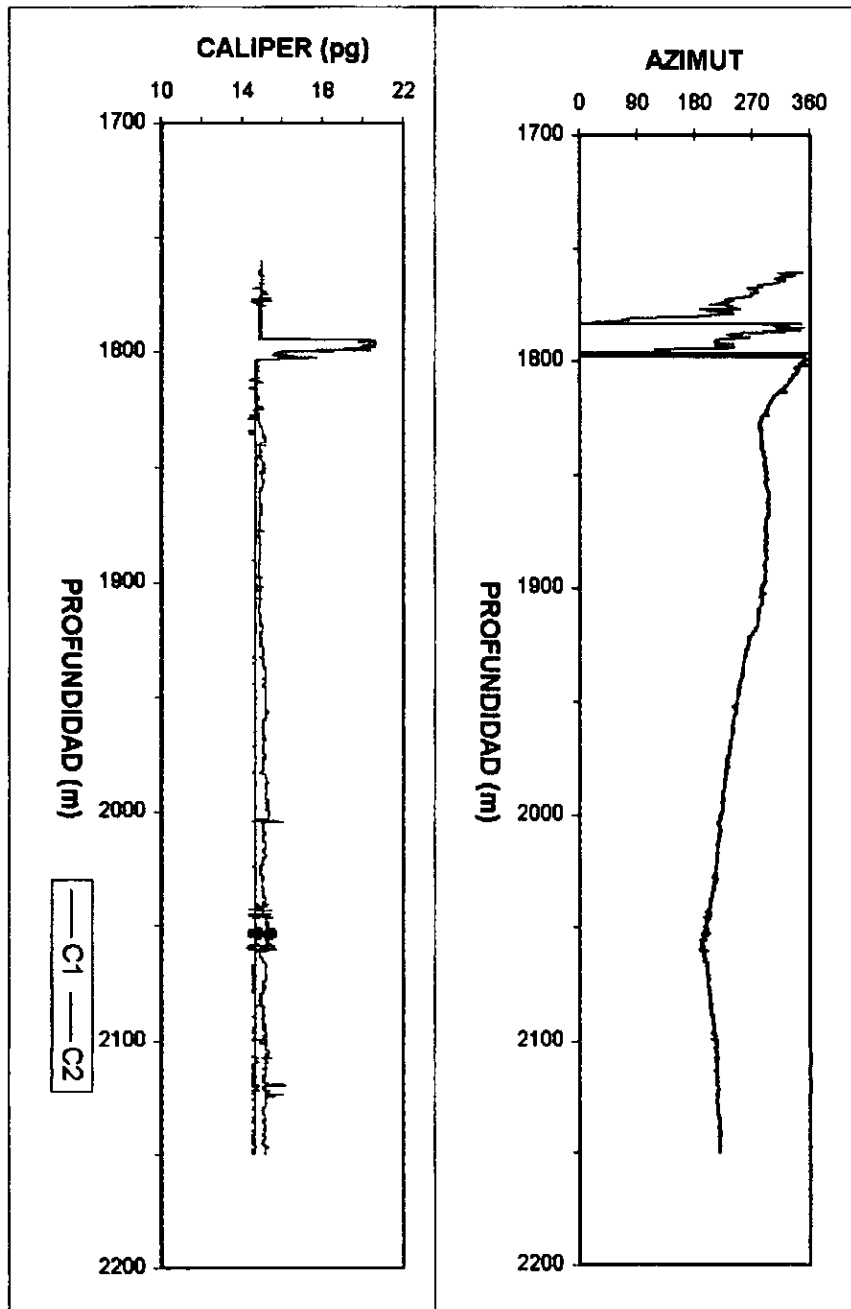
El siguiente paso fue correr el programa con dicho registro; la tabla 5.1 muestra los resultados del programa, las columnas de profundidad, azimuth del patín 1, caliper 1 y caliper 2 son los datos del registro, las columnas de ovalidad y rumbo son los resultados arrojados por el programa, en la columna de ovalidad simplemente nos dice si existe en ese punto o no y en la columna de rumbo nos indica el rumbo de dicha ovalidad, si el punto no muestra ovalidad, entonces el rumbo marcado es el que corresponde al mayor diámetro medido.

Debido a la gran cantidad de resultados (4794) solo se imprimieron algunos al azar.

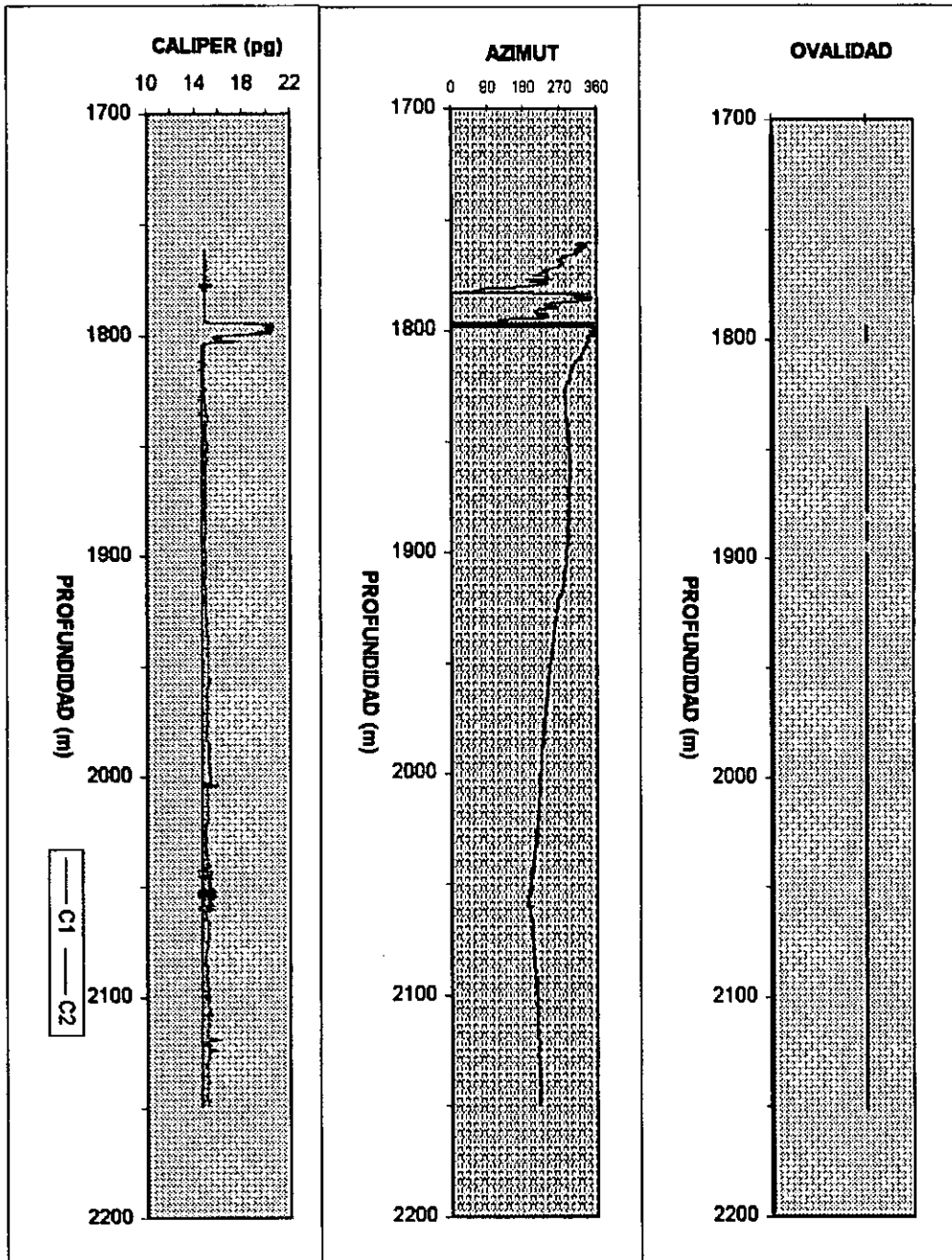
La gráfica 5.2 muestra los resultados del programa, en la cual se observa que si existe ovalidad, y su respectivo azimuth; como era de esperarse en la zona ya antes mencionada con separación entre calibradores corresponde a ovalidades, dicha zona va de 1830 a 2149 m aproximadamente con un rumbo promedio de  $53.24^\circ$  SW ( $53^\circ 14'$  SW).

De tal forma, se podría concluir con lo antes observado que el mínimo esfuerzo en dicha zona sigue la misma orientación que las ovalidades, mientras que el máximo esfuerzo horizontal estaría a  $90^\circ$  es decir con una orientación aproximada de  $36.77^\circ$  NW.





Gráfica 5.1 Registro de calibración y azimut del patín 1 para el pozo Nix-1.



Gráfica 5.2 Resultados del programa (zonas con ovalidad en color rojo) para el pozo Nix-1.

PROF	P1AZ	C1	C2	OVAL	RBO	--
1760.281	349.625	15.008	15.008	0	10.375	NW
1760.362	349.625	15.008	15.008	0	10.375	NW
1760.443	339.875	15.008	15.008	0	20.125	NW
1760.525	335.375	15.008	15.008	0	24.625	NW
1760.606	331.125	15.008	15.008	0	28.875	NW
1760.687	326.875	15.008	15.008	0	33.125	NW
1760.769	321.125	15.008	15.008	0	38.875	NW
1760.85	316.625	15.008	15.008	0	43.375	NW
1760.931	312.375	15.008	15.008	0	47.625	NW
1761.012	312.375	15.008	15.008	0	47.625	NW
1761.094	313.875	15.008	15.008	0	46.125	NW
1761.175	315.125	15.008	15.008	0	44.875	NW
1761.256	316.625	15.008	15.008	0	43.375	NW
1761.338	326.625	15.008	15.008	0	33.375	NW
1761.419	331.125	15.008	15.008	0	28.875	NW
1761.5	332.375	15.008	15.008	0	27.625	NW
1761.581	335.375	15.008	15.008	0	24.625	NW
1761.663	336.875	15.008	15.008	0	23.125	NW
1761.744	336.875	15.008	15.008	0	23.125	NW
1761.825	338.375	15.008	15.008	0	21.625	NW
1761.907	338.375	15.008	15.008	0	21.625	NW
1761.988	333.875	15.008	15.008	0	26.125	NW
1762.069	333.875	15.008	15.008	0	26.125	NW
1762.15	332.625	15.008	15.008	0	27.375	NW
1762.232	329.625	15.008	15.008	0	30.375	NW
1762.313	331.125	15.008	15.008	0	28.875	NW
1762.394	331.125	15.008	15.008	0	28.875	NW
1762.475	325.375	15.008	15.008	0	34.625	NW
1762.557	323.875	15.008	15.008	0	36.125	NW
1762.638	320.875	15.008	15.008	0	39.125	NW
1762.719	318.125	15.008	15.008	0	41.875	NW
1762.801	316.625	15.008	15.008	0	43.375	NW
1762.882	316.625	15.008	15.008	0	43.375	NW
1762.963	313.625	15.008	15.008	0	46.375	NW
1763.044	315.125	15.008	15.008	0	44.875	NW
1763.126	315.125	15.008	15.008	0	44.875	NW
1763.207	313.625	15.008	15.008	0	46.375	NW
1763.288	313.625	15.008	15.008	0	46.375	NW
1763.37	313.625	15.008	15.008	0	46.375	NW
1763.451	309.625	15.008	15.008	0	50.375	NW
1763.532	306.625	15.008	15.008	0	53.375	NW
1763.613	308.125	15.008	15.008	0	51.875	NW
1763.695	309.625	15.008	15.008	0	50.375	NW
1763.776	312.375	15.008	15.008	0	47.625	NW
1763.857	318.125	15.008	15.008	0	41.875	NW
1763.939	322.375	15.008	15.008	0	37.625	NW
1764.02	323.875	15.008	15.008	0	36.125	NW
1764.101	323.875	15.008	15.008	0	36.125	NW
1764.182	320.875	15.008	15.008	0	39.125	NW

Tabla 5.1 Resultados del programa

1764.264	318.125	15.008	15.008	0	41.875	NW
1764.345	315.125	15.008	15.008	0	44.875	NW
1764.426	312.375	15.008	14.93	0	47.625	NW
1764.508	310.875	15.008	14.93	0	49.125	NW
1764.589	310.875	15.008	14.93	0	49.125	NW
1764.67	310.875	15.008	14.93	0	49.125	NW
1764.751	310.875	15.008	14.93	0	49.125	NW
1764.833	313.875	15.008	15.008	0	46.125	NW
1764.914	312.375	14.93	14.93	0	47.625	NW
1764.995	312.375	14.93	14.93	0	47.625	NW
1765.077	313.875	14.93	14.93	0	46.125	NW
1765.158	312.375	14.93	14.93	0	47.625	NW
1765.239	309.375	14.93	15.008	0	39.375	NE
1765.32	307.875	14.93	15.008	0	37.875	NE
1765.402	306.625	14.93	15.008	0	36.625	NE
1765.483	302.375	14.93	14.93	0	57.625	NW
1765.564	299.375	14.93	14.93	0	60.625	NW
1765.645	295.125	14.93	14.852	0	64.875	NW
1765.727	292.125	15.008	15.008	0	67.875	NW
1765.808	292.125	15.008	15.008	0	67.875	NW
1765.889	290.875	15.008	15.008	0	69.125	NW
1765.971	286.625	15.008	15.008	0	73.375	NW
1766.052	283.625	15.008	15.008	0	76.375	NW
1766.133	280.625	15.008	15.008	0	79.375	NW
1766.214	279.375	15.008	15.008	0	80.625	NW
1766.296	279.375	15.086	14.93	0	80.625	NW
1766.377	279.375	15.086	14.93	0	80.625	NW
1766.458	277.875	15.008	15.008	0	82.125	NW
1766.54	282.125	15.008	15.008	0	77.875	NW
1766.621	285.125	15.008	15.008	0	74.875	NW
1766.702	283.625	15.008	15.008	0	76.375	NW
1766.783	285.125	15.008	15.008	0	74.875	NW
1766.865	286.625	15.008	15.008	0	73.375	NW
1766.946	286.625	15.008	15.008	0	73.375	NW
1767.027	286.625	15.008	15.008	0	73.375	NW
1767.109	286.625	15.008	15.008	0	73.375	NW
1767.19	283.625	15.008	15.008	0	76.375	NW
1767.271	280.625	15.008	15.008	0	79.375	NW
1767.352	277.875	15.008	15.008	0	82.125	NW
1767.434	272.125	15.008	15.008	0	87.875	NW
1767.515	270.625	15.008	15.008	0	89.375	NW
1767.596	269.125	15.008	15.008	0	89.125	SW
1767.677	266.375	15.008	15.008	0	86.375	SW
1767.759	263.375	15.008	15.008	0	83.375	SW
1767.84	264.875	15.008	15.008	0	84.875	SW
1767.921	266.375	15.008	15.008	0	86.375	SW
1768.003	267.875	15.008	15.008	0	87.875	SW
1768.084	270.625	15.086	15.008	0	89.375	NW
1768.165	270.625	15.086	15.008	0	89.375	NW
1768.246	273.375	15.008	15.008	0	86.625	NW

Tabla 5.1 Resultados del programa

1829.288	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1829.369	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1829.45	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1829.531	282.125	14.844	14.688	0	77.875	NW
1829.613	279.375	14.844	14.688	0	80.625	NW
1829.694	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1829.775	286.375	14.844	14.688	0	73.625	NW
1829.857	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1829.938	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1830.019	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.1	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.182	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1830.263	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.344	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.426	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.507	286.375	14.844	14.688	0	73.625	NW
1830.588	286.375	14.844	14.688	0	73.625	NW
1830.669	283.625	14.844	14.688	0	76.375	NW
1830.751	285.125	14.844	14.688	0	74.875	NW
1830.832	285.125	14.93	14.688	0	74.875	NW
1830.913	282.125	14.93	14.688	0	77.875	NW
1830.995	285.125	14.93	14.688	0	74.875	NW
1831.076	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.157	283.625	14.93	14.688	1	76.375	NW
1831.238	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.32	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.401	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.482	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.563	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.645	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.726	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.807	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.889	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1831.97	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1832.051	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1832.132	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1832.214	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1832.295	286.625	14.93	14.688	1	73.375	NW
1832.376	286.625	14.93	14.688	1	73.375	NW
1832.458	283.625	14.93	14.688	1	76.375	NW
1832.539	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW
1832.62	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1832.701	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1832.783	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1832.864	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1832.945	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.027	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.108	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.189	283.625	15.008	14.688	1	76.375	NW
1833.27	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW

Tabla 5.1 Resultados del programa

1833.352	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.433	283.625	15.008	14.688	1	76.375	NW
1833.514	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.595	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.677	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.758	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.839	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1833.921	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.002	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.083	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.164	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.246	283.625	15.008	14.688	1	76.375	NW
1834.327	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.408	283.625	15.008	14.688	1	76.375	NW
1834.49	283.625	15.008	14.367	1	76.375	NW
1834.571	285.125	15.008	14.367	1	74.875	NW
1834.652	286.625	15.008	14.688	1	73.375	NW
1834.733	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1834.815	286.625	15.008	14.688	1	73.375	NW
1834.896	286.625	15.008	14.688	1	73.375	NW
1834.977	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW
1835.059	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.14	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.221	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.302	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.384	286.625	15.086	14.688	1	73.375	NW
1835.465	285.125	15.086	14.445	1	74.875	NW
1835.546	285.125	15.086	14.445	1	74.875	NW
1835.628	286.625	15.008	14.688	1	73.375	NW
1835.709	286.625	15.008	14.688	1	73.375	NW
1835.79	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.871	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1835.953	286.625	15.086	14.688	1	73.375	NW
1836.034	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1836.115	286.625	15.086	14.688	1	73.375	NW
1836.197	286.625	15.086	14.688	1	73.375	NW
1836.278	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW
1836.359	287.875	15.156	14.688	1	72.125	NW
1836.44	287.875	15.086	14.688	1	72.125	NW
1836.522	286.375	15.086	14.688	1	73.625	NW
1836.603	287.875	15.086	14.688	1	72.125	NW
1836.684	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW
1836.765	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW
1836.847	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW
1836.928	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW
1837.009	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW
1837.091	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW
1837.172	287.875	15.156	14.688	1	72.125	NW
1837.253	285.125	15.086	14.688	1	74.875	NW
1837.334	286.375	15.086	14.688	1	73.625	NW

Tabla 5.1 Resultados del programa

1886.184	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1886.265	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1886.346	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW
1886.427	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW
1886.509	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1886.59	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW
1886.671	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW
1886.753	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1886.834	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1886.915	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW
1886.996	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW
1887.078	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW
1887.159	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW
1887.24	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1887.322	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW
1887.403	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1887.484	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1887.565	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1887.647	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1887.728	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1887.809	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW
1887.891	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1887.972	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1888.053	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1888.134	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1888.216	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1888.297	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1888.378	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW
1888.459	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1888.541	287.875	14.93	14.688	1	72.125	NW
1888.622	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1888.703	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1888.785	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1888.866	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1888.947	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW
1889.028	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.11	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.191	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.272	287.875	14.93	14.688	1	72.125	NW
1889.354	287.875	14.93	14.688	1	72.125	NW
1889.435	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.516	287.875	14.93	14.688	1	72.125	NW
1889.597	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.679	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.76	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW
1889.841	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW
1889.923	292.375	14.844	14.688	0	67.625	NW
1890.004	289.375	14.844	14.688	0	70.625	NW
1890.085	289.375	14.844	14.688	0	70.625	NW
1890.166	290.875	14.844	14.688	0	69.125	NW

Tabla 5.1 Resultados del programa

2145.711	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2145.792	220.188	15.086	14.688	1	40.188	SW
2145.873	221.688	15.086	14.688	1	41.688	SW
2145.955	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2146.036	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW
2146.117	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW
2146.198	218.688	15.156	14.688	1	38.688	SW
2146.28	218.688	15.156	14.688	1	38.688	SW
2146.361	220.188	15.25	14.773	1	40.188	SW
2146.442	218.688	15.25	14.773	1	38.688	SW
2146.523	218.688	15.328	14.773	1	38.688	SW
2146.605	221.688	15.328	14.773	1	41.688	SW
2146.686	221.688	15.328	14.773	1	41.688	SW
2146.767	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW
2146.849	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW
2146.93	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2147.011	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW
2147.093	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW
2147.174	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW
2147.255	221.562	15.25	14.688	1	41.562	SW
2147.336	221.562	15.156	14.688	1	41.562	SW
2147.417	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2147.499	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2147.58	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2147.661	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2147.743	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2147.824	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2147.905	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2147.987	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2148.068	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW
2148.149	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW
2148.23	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2148.312	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2148.393	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW
2148.474	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2148.555	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2148.637	221.562	15.156	14.688	1	41.562	SW
2148.718	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2148.799	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2148.881	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW
2148.962	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW
2149.043	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW
2149.125	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2149.206	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW
2149.287	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW
2149.368	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW
2149.45	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2149.531	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW
2149.612	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2149.693	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW
2149.775	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW

Tabla 5.1 Resultados del programa



## **6. Desarrollo de un programa de cómputo que permita conocer la magnitud de los esfuerzos horizontales en la formación a partir de la ovalidad del pozo.**

### **6.1 Elementos básicos para el análisis de un pozo**

En esta parte del trabajo se realizó un programa de cómputo que calcula la magnitud de los esfuerzos in-situ horizontales en la formación, mediante la teoría expuesta por Zoback y Moos<sup>32</sup> en 1985, pero a diferencia de lo que dichos autores hicieron en este trabajo aquí se tomo en cuenta la diferencia de presión que existe en la formación y en el pozo, ya que se trata de hacer un análisis mas realista de lo que realmente sucede en el pozo.

Es común al momento de perforar el mantener la presión de fondo del pozo ligeramente mayor a la de formación (excepto en perforación bajo balance), esto debido a que de no hacerlo así se tendrían problemas de inestabilidad del pozo, derrumbes, así como pérdidas de circulación y hasta la posible pérdida del pozo. Por otro lado una presión en el pozo menor a la de la formación podría ocasionar entrada de fluidos al pozo así como otros problemas.

El efecto de la diferencia de presión entre la formación y el pozo ya se vio en el capítulo 4 por lo que aquí solo se verán sus efectos en un ejemplo práctico.

Además de la modificación anterior a lo presentado por Zoback y Moos<sup>32</sup> en 1985, también a este programa se le añadió la correlación de García Gavito<sup>5</sup> para el caso en que no se conozca la resistencia cohesiva de la roca, ya que este parámetro no es común que se obtenga en pozos Mexicanos, con esto se tiene una alternativa en

caso de no contar con dicho parámetro, ya que como se vio para esta correlación solo se necesita la porosidad de la roca, la cual generalmente se obtiene en todos los pozos y siempre esta disponible, también se requiere saber el tipo de roca, lo cual no representa mayor problema.

Para correr este programa se requiere lo siguiente:

1. Que el pozo sea vertical
2. Conocer la resistencia cohesiva de la roca ( $\tau_0$ )  
en caso de no conocerla:
  - a) Saber si la roca esta bien cementada
  - b) Saber la porosidad de dicha roca
3. El coeficiente de deslizamiento friccional de la roca ( $\mu$ )
4. Diámetro de la barrena (R)
5. Diámetro alargado por efecto de elongación (r)
6. Densidad del fluido
7. Presión de formación

## 6.2. Bases teóricas

Como ya se dijo el modelo analítico más completo para evaluar las ovalidades del agujero ha sido el derivado por Zoback<sup>32</sup> en 1985. La forma y tamaño de la ovalidad está controlada por las magnitudes de los esfuerzos, parámetros de resistencia de la roca y la presión de poro en la roca. En esta parte se mostrara la solución general que permite conocer los esfuerzos horizontales SH y Sh en función del radio alargado por efecto de la diferencia de dichos esfuerzos y ángulo de la misma.

Suponiendo nuevamente que la ovalidad es una zona causada por efecto de esfuerzos compresivos y que es limitada por una superficie definida por la cohesión del material  $\tau_0$ . Como un simple valor de  $\tau_0$  define el límite de la ovalidad, podemos analizar la forma de la ovalidad por su profundidad máxima,  $r=r_b$  (en  $\theta=90^\circ$ ) y por el azimut del punto en el cual la ovalidad intersecta al agujero,  $\theta=\theta_b$  (en  $r=R$ ).

$$\tau_{\theta} = -0.5(SH + Sh)\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

Se puede ver que  $\tau_{\theta}=0$  siempre que  $r=R$  o  $\theta=90^\circ$ . Cuando  $\tau_{\theta}=0$  se tiene:

$$\omega = \frac{1}{2}(1 + \mu^2)^{1/2}(\sigma_{\theta} - \sigma_r) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_{\theta} + \sigma_r) \dots \dots \dots (6.1)$$

Si  $SH \leq 3Sh$  y  $\Delta P = 0$ , entonces  $\sigma_{\theta} > \sigma_r$  en cualquier lugar en la vecindad del pozo. Si sustituimos las ecuaciones 4.1 a 4.3 en la 4.4, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\omega(R, \theta_b) = \frac{1}{2}[(a_1 + a_2)SH + (b_1 + b_2)Sh] + e\Delta P \dots \dots \dots (6.2)$$

$$\omega(r_b, 90) = \frac{1}{2}[(c_1 + c_2)SH + (d_1 + d_2)Sh] + f\Delta P \dots \dots \dots (6.3)$$

donde:

$$a_1 = -\mu(1 - 2 \cos 2\theta_b)$$

$$a_2 = (1 + \mu^2)^{1/2}(1 - 2 \cos 2\theta_b)$$

$$b1 = -\mu(1 + 2 \cos 2\theta b)$$

$$b2 = (1 + \mu^2)^{1/2} (1 + 2 \cos 2\theta b)$$

$$c1 = -\mu(1 + \frac{2R^2}{rb^2})$$

$$c2 = (1 + \mu^2)^{1/2} (1 - \frac{R^2}{rb^2} + \frac{3R^4}{rb^4}) \dots \dots \dots (6.4)$$

$$d1 = -\mu(1 - \frac{2R^2}{rb^2})$$

$$d2 = (1 + \mu^2)^{1/2} (-1 + \frac{3R^2}{rb^2} - \frac{3R^4}{rb^4})$$

$$e = -(1 + \mu^2)^{1/2}$$

$$f = -(1 + \mu^2)^{1/2} \frac{R^2}{rb^2}$$

Utilizando las fórmulas 4.9 a 4.11 se tiene:

$$Sh = 2 \frac{(a1 + a2)(\tau_0 + f\Delta P) - (c1 + c2)(\tau_0 - e\Delta P)}{(a1 + a2)(d1 + d2) - (b1 + b2)(c1 + c2)} \dots \dots \dots (6.5)$$

$$SH = 2 \frac{(d1 + d2)(\tau_0 + e\Delta P) - (b1 + b2)(\tau_0 - f\Delta P)}{(a1 + a2)(d1 + d2) - (b1 + b2)(c1 + c2)} \dots \dots \dots (6.6)$$

$$\frac{SH}{Sh} = \frac{(d1 + d2)(\tau_0 - e\Delta P) - (b1 + b2)(\tau_0 - f\Delta P)}{(a1 + a2)(\tau_0 - f\Delta P) - (c1 + c2)(\tau_0 - e\Delta P)} \dots \dots \dots (6.7)$$

Se puede observar que si  $\Delta P=0$  estas ecuaciones se reducen a las ecuaciones 4.9-4.11.

### 6.3 Funcionamiento del programa

El programa fue hecho en BASIC y los datos que requiere para funcionar son:

a) La resistencia cohesiva de la roca ( $\tau_0$ )- debe estar en MPa, en caso de no contar con ella, el programa cuenta con una correlación que requiere el tipo de roca y la porosidad de esta para calcular su resistencia cohesiva.

b) Coeficiente de deslizamiento friccional ( $\mu$ )- en el capítulo 4 se cuenta con tablas para diferentes tipos de rocas

c) Diámetro de la barrena (R)- puede darse en pulgadas o centímetros, siempre y cuando sea consistente con las unidades del diámetro alargado.

d) Diámetro alargado por efecto de la diferencia de esfuerzos (r)- puede darse en pulgadas o centímetros, siempre y cuando sea consistente con las unidades del diámetro de la barrena.

e) Angulo de la ovalidad ( $\theta$ )- debe estar en grados.

f) Diferencia entre la presión de la formación y la del pozo ( $\Delta P$ )- debe estar en MPa.

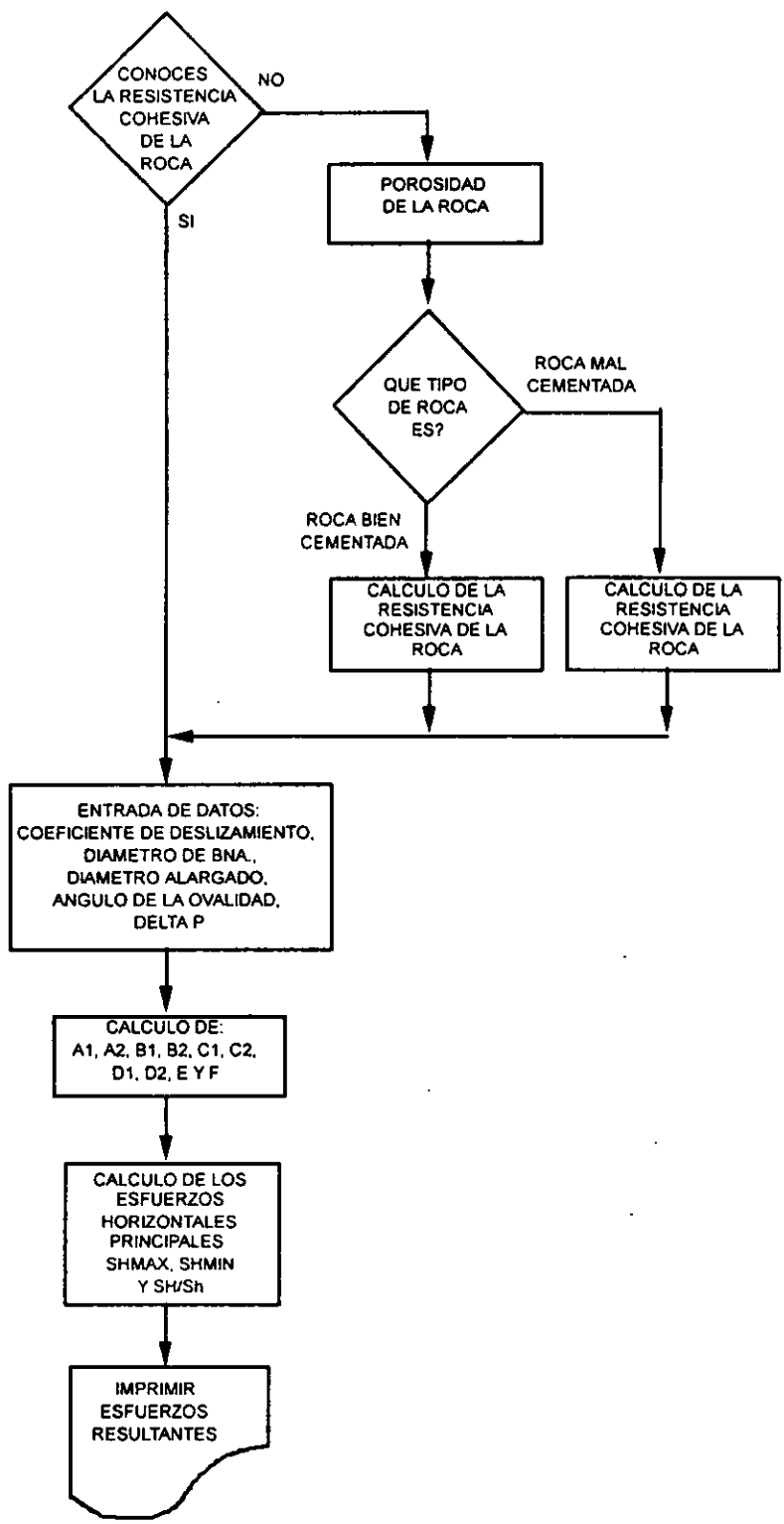
Después de efectuar los cálculos necesarios, el programa despliega los resultados siguientes:

SHMIN - corresponde al esfuerzo horizontal menor Sh en MPa.

SHMAX - corresponde al esfuerzo horizontal mayor SH en MPa.

RELACION DE ESFUERZOS - corresponde al cociente SH/Sh.

### 6.4. Diagrama de flujo



## 6.5 Programa de cómputo

```
' UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
' DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
' FACULTAD DE INGENIERIA

' PROGRAMA PARA CALCULAR LA MAGNITUD DE
' LOS ESFUERZOS HORIZONTALES

' AUTOR: ING. CUAUHEMOC SOTO SANCHEZ
' DIRECTOR: DR. DANIEL GARCIA GAVITO
```

CLS

```
' ENTRADA DE DATOS
10 PRINT
INPUT "CONOCES LA RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA (S/N)"; S$
IF S$ = "S" THEN
INPUT "RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA [MPa]"; TAO
ELSE

' CALCULO DE LA RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA
PRINT "QUE TIPO DE ROCA ES?"
PRINT " 1) ROCA BIEN CEMENTADA"
INPUT " 2) ROCA MAL CEMENTADA"; ROC
INPUT "POROSIDAD DE LA ROCA"; POR
IF ROC = 1 THEN
CO = (66889 - 84063 * LOG(POR) + 26091 * (LOG(POR)) ^ 2) / 145
ELSE
CO = (9953 - 7892 * LOG(POR) + 1203 * (LOG(POR)) ^ 2) / 145
END IF
TAO = CO / 8
END IF
```

' ENTRADA DE DATOS

INPUT "COEFICIENTE DE DESLIZAMIENTO FRICCIONAL"; MU  
INPUT "RADIO DE LA BARRENA [pg,cm]"; BNA  
INPUT "RADIO ALARGADO [pg,cm]"; CAL1  
INPUT "ANGULO DE LA OVAL [grados]"; TETA  
INPUT "DELTA P [MPa]"; DELP

$$R2 = (BNA / 2) ^ 2 / (CAL1 / 2) ^ 2$$

$$R4 = (BNA / 2) ^ 4 / (CAL1 / 2) ^ 4$$

' CALCULO DE SH Y Sh

$$A1 = -MU * (1 - 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))$$

$$A2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 - 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))$$

$$B1 = -MU * (1 + 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))$$

$$B2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 + 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))$$

$$C1 = -MU * (1 + 2 * R2)$$

$$C2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 - R2 + 3 * R4)$$

$$D1 = -MU * (1 - 2 * R2)$$

$$D2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (-1 + 3 * R2 - 3 * R4)$$

$$E = -(1 + MU ^ 2) ^ .5$$

$$F = -(1 + MU ^ 2) ^ .5 * R2$$

' RESULTADOS

PRINT

$$SHMIN = 2 * (((A1 + A2) * (TAO + F * DELP) - (C1 + C2) * (TAO - E * DELP)) / ((A1 + A2) * (D1 + D2) - (B1 + B2) * (C1 + C2)))$$

$$SHMAX = 2 * (((D1 + D2) * (TAO - E * DELP) - (B1 + B2) * (TAO - F * DELP)) / ((A1 + A2) * (D1 + D2) - (B1 + B2) * (C1 + C2)))$$

$$REL = SHMAX / SHMIN$$

PRINT "SHMIN="; SHMIN; "[MPa]"

PRINT "SHMAX="; SHMAX; "[MPa]"

PRINT "RELACION DE ESFUERZOS="; REL

PRINT

INPUT "QUIERES OTRO CALCULO (S/N)"; OTROS

IF OTROS\$ = "S" THEN 10



## 6.6 Ejemplo de aplicación

La mejor forma de verificar el funcionamiento del programa es comparándolo con un ejemplo real, para esto se examinaron diversos artículos, de los cuales se seleccionó el que contaba con mayor información.

El artículo escrito por Haimson y Herrick<sup>8</sup> es un estudio experimental de las ovalidades, cuyo objetivo fue el estudiar en el laboratorio la relación de estados in-situ y las ovalidades del agujero bajo condiciones simuladas. La roca usada para las pruebas fue la caliza indiana en bloques rectangulares de 13 x 13 x 18 cm, los cuales tenían una perforación de 2.14 cm de diámetro en su centro, los bloques fueron sujetos a un estado de esfuerzos triaxial con la ayuda de una celda poliaxial, que permite aplicar tres cargas uniformes independientes y perpendiculares (cada carga de hasta 100 MPa, lo cual simularía una carga de una profundidad de hasta 5 Km).

Los parámetros establecidos para la caliza indiana fueron: para muestra seca:  $\tau_0 = 8$  MPa,  $\mu = 0.58$  y para muestra húmeda:  $\tau_0 = 7.5$  MPa,  $\mu = 0.54$ .

La primera parte de las pruebas consistieron en aplicar a las muestras un esfuerzo vertical y dos horizontales midiendo  $r_b$  y  $\theta_b$  en cada prueba, inclusive se repitieron varias pruebas a las mismas condiciones con el fin de ver la consistencia de los resultados, mostrando estos un comportamiento muy similar a los mismos esfuerzos aplicados en cuanto a  $r_b$  se refiere mientras que para  $\theta_b$  se observó una gran discrepancia de lo medido experimentalmente con lo predecido por la teoría de

Zoback y Moos. En la tabla 6.1 se listan las lecturas experimentales obtenidas de  $r_b$  y  $\theta_b$  para los diferentes esfuerzos horizontales aplicados.

Caso	Condición de la roca	Sh MPa	SH MPa	$r_b$ (experimental) cm	$\theta_b$ (experimental) cm
1	seca	4.4	42.9	1.37	45
2	seca	9.0	49.5	1.49	59
3	húmeda	1.5	27.4	1.16	26
4	húmeda	4.4	32.9	1.39	47
5	húmeda	8.8	44.7	1.61	60
6	húmeda	13.2	53.4	1.92	76

Tabla 6.1 Dimensiones experimentales de ovalidades a diferentes esfuerzos, para  $\Delta P=0$ ,  $\mu=0.58$ ,  $R=1.07$  cm y  $\tau_0=8$  MPa.<sup>8</sup>

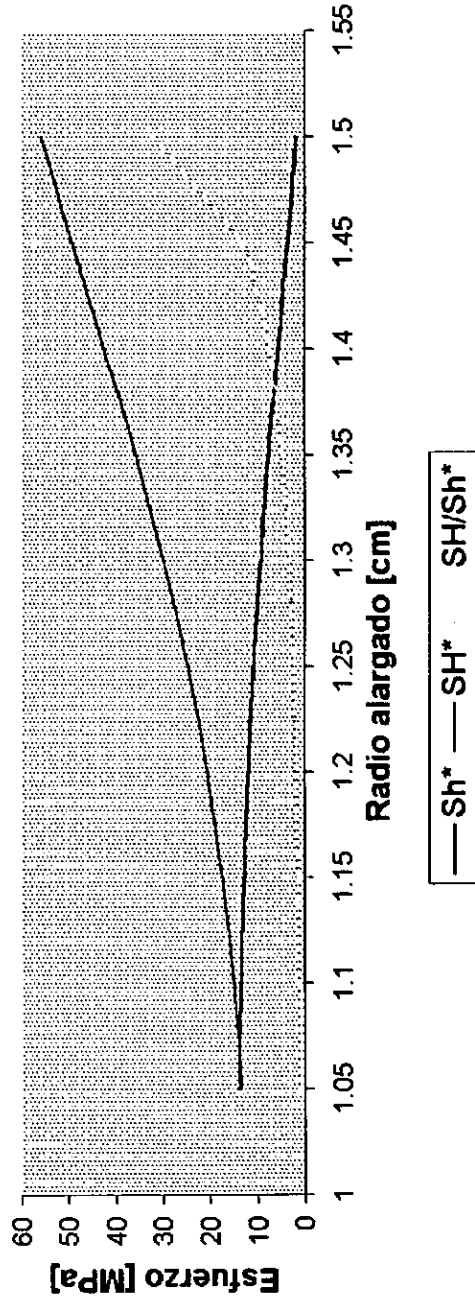
Aplicando el programa desarrollado para el caso 1, variando  $r_b$  y  $\theta_b$  (ver gráficas 6.1 y 6.2) se pudo observar que aproximadamente una lectura de  $r_b=1.43$  cm y  $\theta=37^\circ$  dan como resultado un esfuerzo horizontal máximo  $SH=46.5$  MPa, un esfuerzo horizontal mínimo de 4.4 MPa y una relación de esfuerzos  $SH/Sh=10.4$ . Como se puede observar el error cometido para este caso es relativamente poco, para el caso 1 el error en  $r_b$  fue igual a 4% y el error para  $\theta_b$  fue de 21% (ver tabla 6.4).

Las gráficas 6.3 y 6.4 muestran como afecta la diferencia de presión entre la formación y el pozo ( $\Delta P$ ) en el cálculo de los esfuerzos horizontales, para los mismos datos del ejemplo anterior. Se puede observar como existen partes de inconsistencia sobre todo a radios y ángulos grandes.

r	Sh*	SH*	SH/SH*
1.05	14	13.3	0.9
1.1	13.6	14.9	1.1
1.15	12.9	17.3	1.3
1.2	12	20.5	1.7
1.25	10.8	24.6	2.3
1.3	9.3	29.7	3.2
1.35	7.6	35.7	4.7
1.4	5.6	42.4	7.5
1.43	4.4	46.5	10.4
1.45	3.7	49.2	13.4
1.5	1.8	55.8	31.7

Resistencia cohesiva de la roca=8 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.58  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Angulo de la ovalidad=37°  
 DP=0  
 Esfuerzos y DP en MPa  
 r en cm  
 Teta en grados

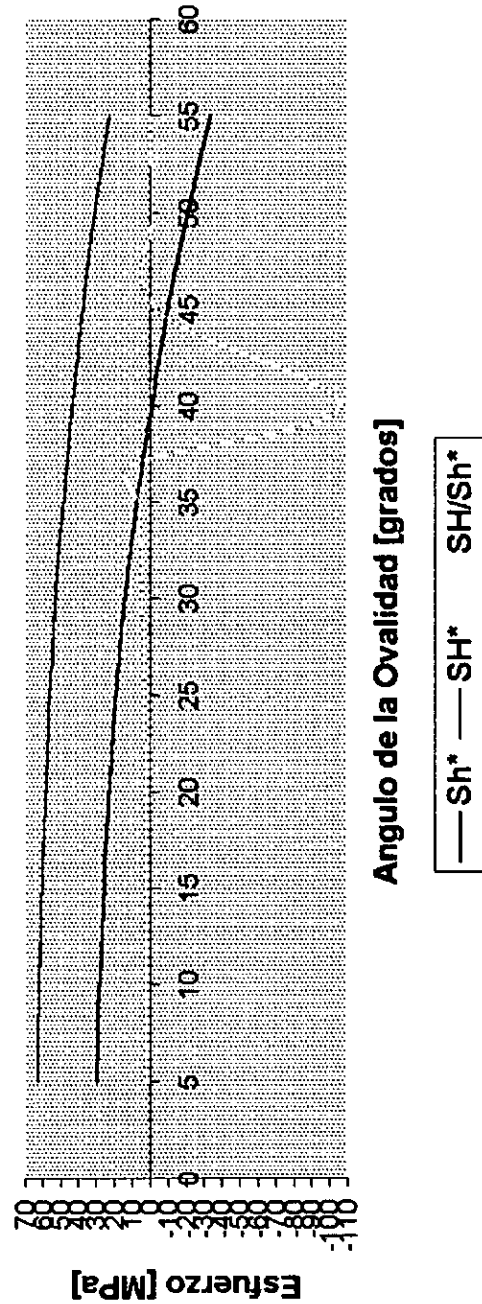
**Gráfica 6.1 Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad para DP=0**



Teta	Sh*	SH*	SH/SH*
5	29.8	62.5	2.1
10	28.5	61.7	2.2
20	23.2	58.4	2.5
30	13.9	52.5	3.8
35	7.4	48.3	6.5
37	4.4	46.5	10.42
40	-0.41	43.4	-105.8
45	-9.7	37.5	-3.8
50	-20.6	30.6	-1.5
55	-33.1	22.7	-0.7

Resistencia cohesiva de la roca=8 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.58  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Radio alargado=1.43 cm  
 DP=0  
 Esfuerzos y DP en MPa  
 r en cm  
 Teta en grados

Gráfica 6.2 Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad para DP=0

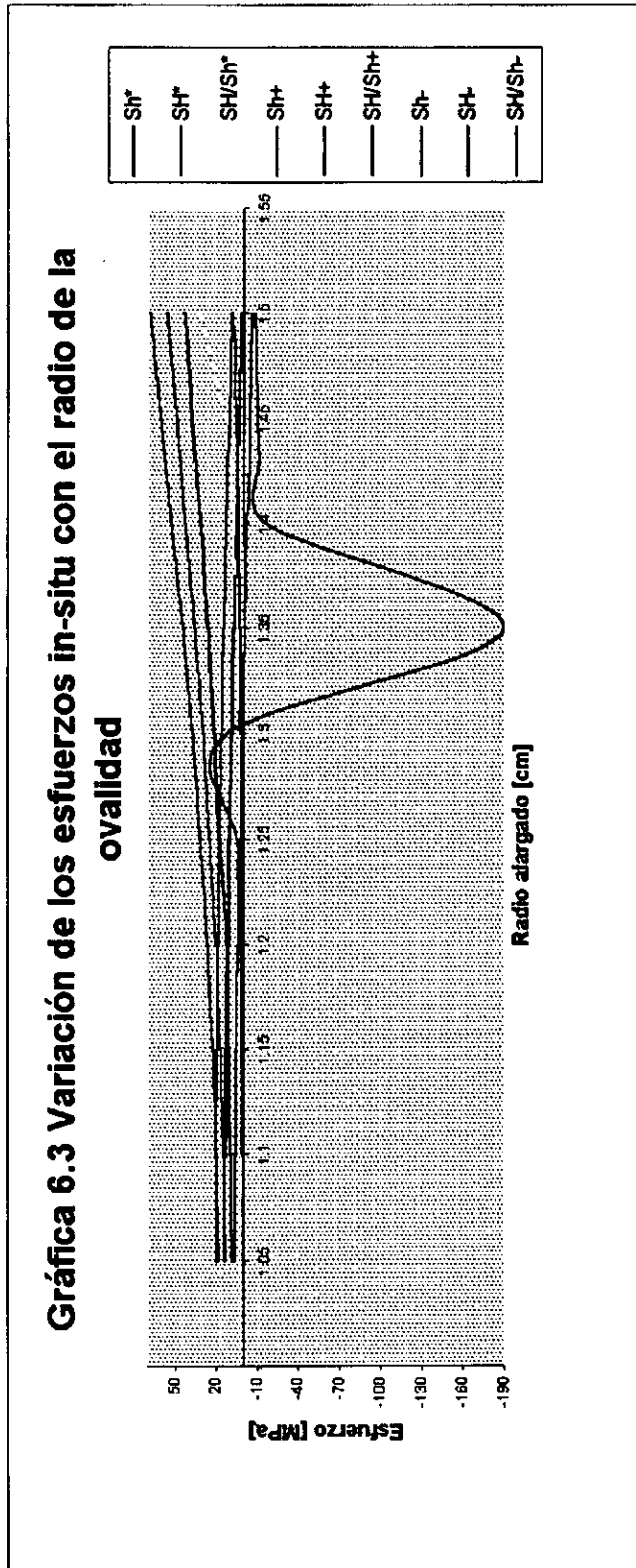


r	DP=0			DP=2.5			DP=-2.5		
	Sh*	SH*	SH/SH*	Sh+	SH+	SH/SH+	Sh-	SH-	SH/SH-
1.05	14	13.3	0.9	20.7	18.2	0.9	7.35	8.4	1.1
1.1	13.6	14.9	1.1	20.5	20.2	0.98	6.7	9.7	1.5
1.15	12.9	17.3	1.3	20	22.9	1.1	5.8	11.7	2
1.2	12	20.5	1.7	19.3	26.7	1.4	4.6	12.3	3.1
1.25	10.8	24.6	2.3	18.3	31.6	1.7	3.3	17.6	5.4
1.3	9.3	29.7	3.2	16.9	37.6	2.2	1.7	21.8	13.1
1.35	7.6	35.7	4.7	15.3	44.7	2.9	-0.14	26.7	-188.7
1.4	5.6	42.4	7.5	13.3	52.5	3.9	-2	32.2	-15.8
1.43	4.4	46.5	10.4	12.08	57.4	4.8	-3.6	35.5	-11.2
1.45	3.7	49.2	13.4	11.2	60.6	5.4	-3.9	37.8	-9.7
1.5	1.8	55.8	31.7	9.1	68.2	7.5	-5.6	43.2	-7.7

Resistencia cohesiva de la roca=8 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.58  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Angulo de la ovalidad=37°  
 Esfuerzos y DP en MPa

r en cm  
 Teta en grados

- \* Para DP=0
- + Para DP=2.5
- Para DP=-2.5

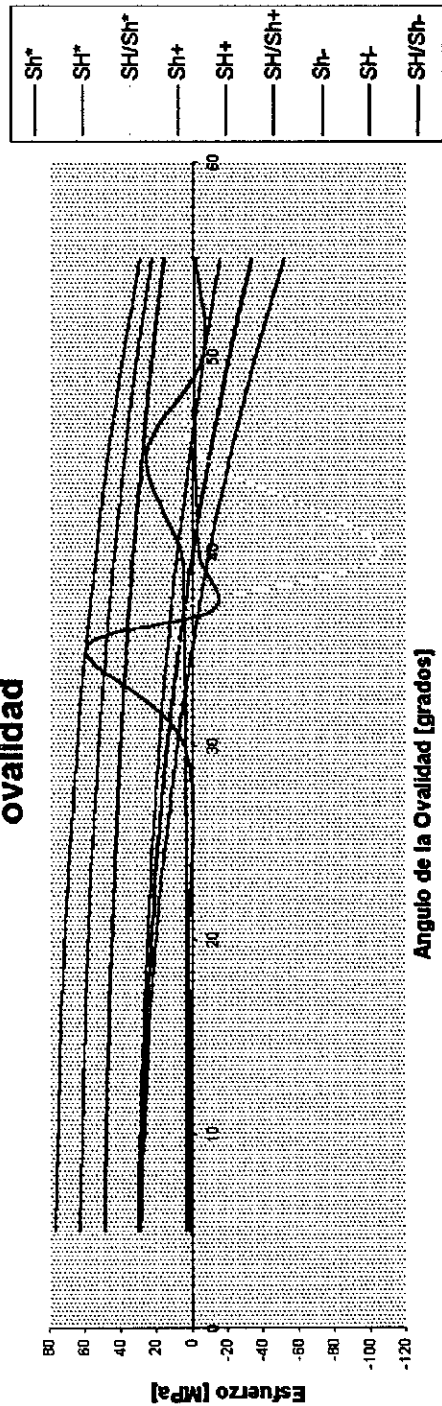


Teta	DP=0			DP=2.5			DP=-2.5		
	Sh*	SH*	SH/SH*	Sh+	SH+	SH/SH+	Sh-	SH-	SH/SH-
5	29.8	62.5	2.1	30.4	76.3	2.5	29.1	48.7	1.6
10	28.5	61.7	2.2	29.5	75.4	2.6	27.5	48	1.7
20	23.2	58.4	2.5	25.7	71.4	2.8	20.8	45.3	2.2
30	13.9	52.5	3.8	18.9	64.5	3.4	8.9	40.4	4.5
35	7.4	48.3	6.5	14.2	59.6	4.2	0.6	37.1	60.4
37	4.4	46.5	10.42	12.08	57.4	4.8	-3.16	35.5	-11.2
40	-0.4	43.4	-105.8	8.6	53.8	6.3	-9.4	33	-3.5
45	-9.7	37.5	-3.8	1.8	46.8	25.6	-21.3	28.2	-1.3
50	-21	30.6	-1.5	-6.1	38.6	-6.4	-35.2	22.5	-0.6
55	-33	22.7	-0.7	-15.1	29.3	-1.9	-51.1	16.1	-0.3

Resistencia cohesiva de la roca=8 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.58  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Radio alargado=1.43 cm  
 Esfuerzos y DP en MPa  
 r en cm  
 Teta en grados

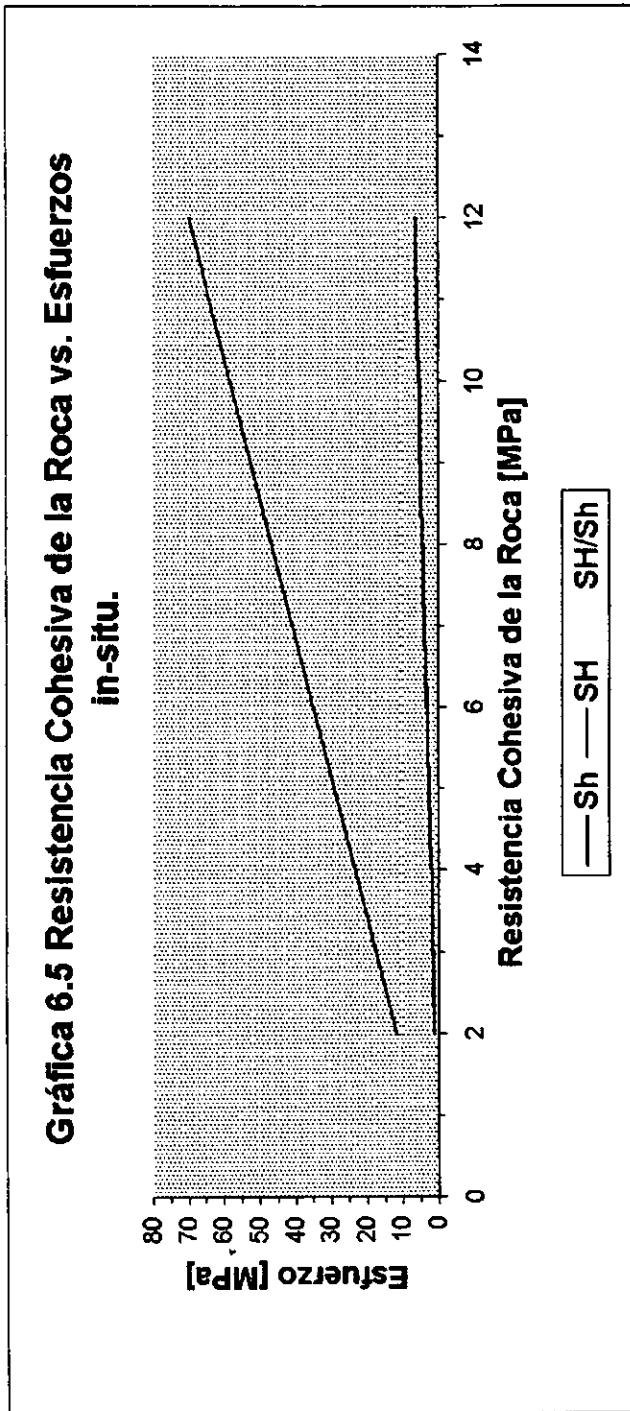
\* Para DP=0  
 + Para DP=2.5  
 - Para DP=-2.5

Gráfica 6.4 Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad



Tao	Sh	SH	SH/Sh
2	1.1	11.6	10.4
4	2.2	23.2	10.4
6	3.3	34.8	10.4
8	4.4	46.4	10.4
10	5.5	58.1	10.4
12	6.6	69.7	10.4

Coeficiente de fricción=0.58  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Radio alargado=1.43 cm  
 Angulo de la ovalidad=37°  
 DP=0 MPa  
 Esfuerzos en MPa



La tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos con el programa y los encontrados en forma experimental por Haimson y Herrick<sup>8</sup> en caliza Indiana.

Caso	Sh (e) MPa	SH (e) MPa	Sh (t) MPa	SH (t) MPa	rb (e) cm	rb (t) cm	error %	θb (e) grados	θb (t) grados	error %
1	4.4	42.9	4.4	46.5	1.37	1.43	4	45	37	-21
2	9.0	49.5	6.4	65.7	1.49	1.53	2	59	34	-73
3	1.5	27.4	6.4	27.6	1.16	1.33	12	26	39	33
4	4.4	32.9	4.0	35.2	1.39	1.41	1.4	47	38.5	-22
5	8.8	44.7	8.5	45.3	1.61	1.47	-9	60	33.5	-79
6	13.2	53.4	13.1	52.9	1.92	1.5	-28	76	29.5	-157

$$\text{error (\%)} = (t - e)/t \times 100 \quad t - \text{teórico} \quad e - \text{experimental}^8$$

Tabla 6.2 Comparación de resultados experimentales y teóricos<sup>8</sup> para caliza Indiana

Utilizando los mismos parámetros del caso 1, se construyó la gráfica 6.5, la cual muestra la variación de los esfuerzos horizontales para diferentes valores de resistencia cohesiva de la roca.

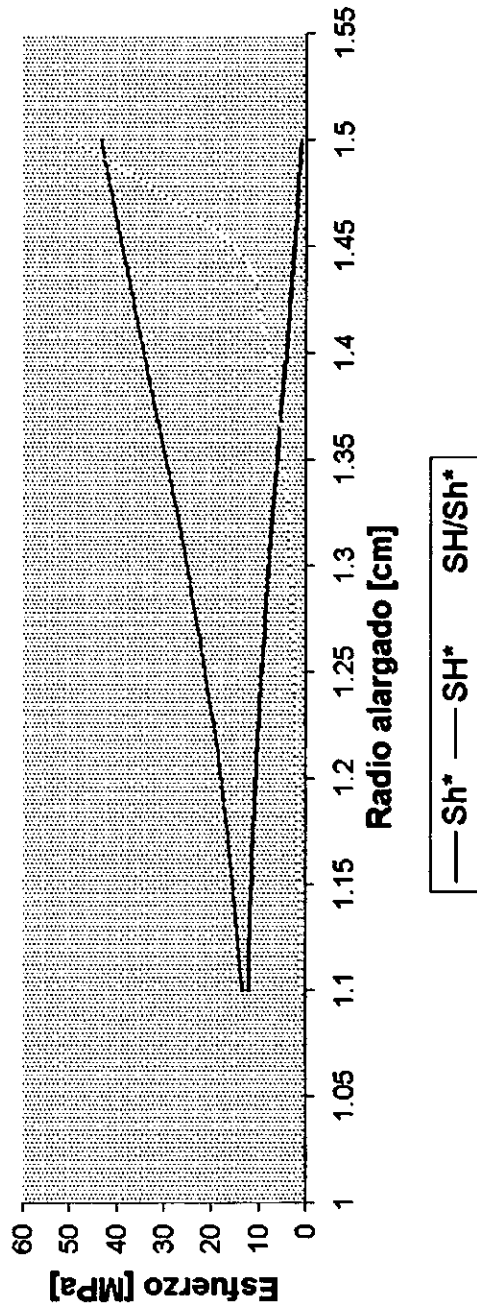
El proceso se repitió para el caso 4 obteniendo las gráficas 6.6-6.9, dando buenas aproximaciones al compararlos con los resultados experimentales (tabla 6.2).



r	Sh*	SH*	SH/SH*
1.1	12.2	13.4	1.1
1.2	10.5	17.9	1.7
1.3	7.8	25.1	3.2
1.35	6.1	29.5	4.8
1.41	3.9	35.2	8.8
1.45	2.5	38.9	15.3
1.5	0.8	43.4	48.9

Resistencia cohesiva de la roca=7.5 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.54  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Angulo de la ovalidad=38.5°  
 DP=0 MPa  
 Esfuerzos en MPa  
 r en cm

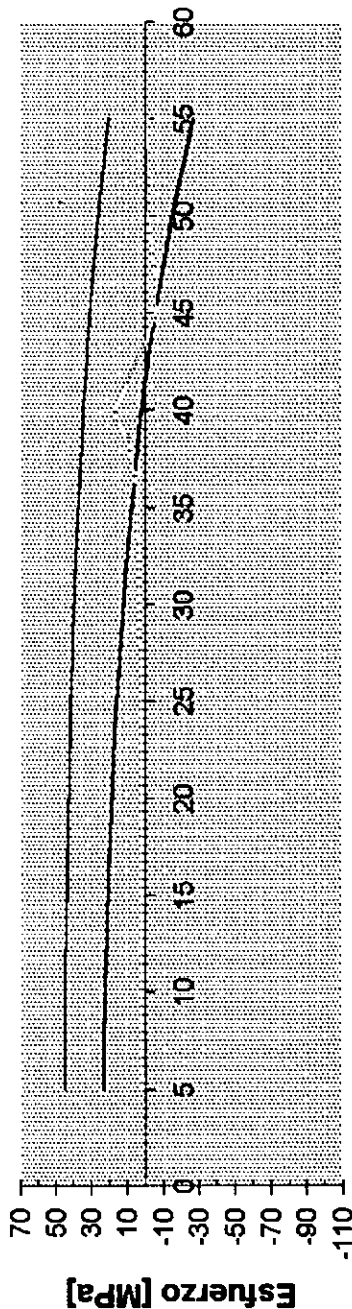
**Gráfica 6.6 Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad para DP=0**



Teta	Sh*	SH*	SH/Sh*
5	23	44.6	1.9
10	22.2	44.2	1.98
20	18.9	42.6	2.25
30	12.6	39.5	3.1
35	7.9	37.2	4.7
38.5	3.97	35.2	8.9
40	2.05	34.3	16.7
45	-5.4	30.6	-5.6
50	-14.9	25.9	-1.7
55	-26.9	19.9	-0.7

Resistencia cohesiva de la roca=7.5 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.54  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Radio alargado=1.41 cm  
 DP=0 MPa  
 Esfuerzos en MPa  
 Teta en grados

**Gráfica 6.7 Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad para DP=0**



Angulo de la Ovalidad [grados]

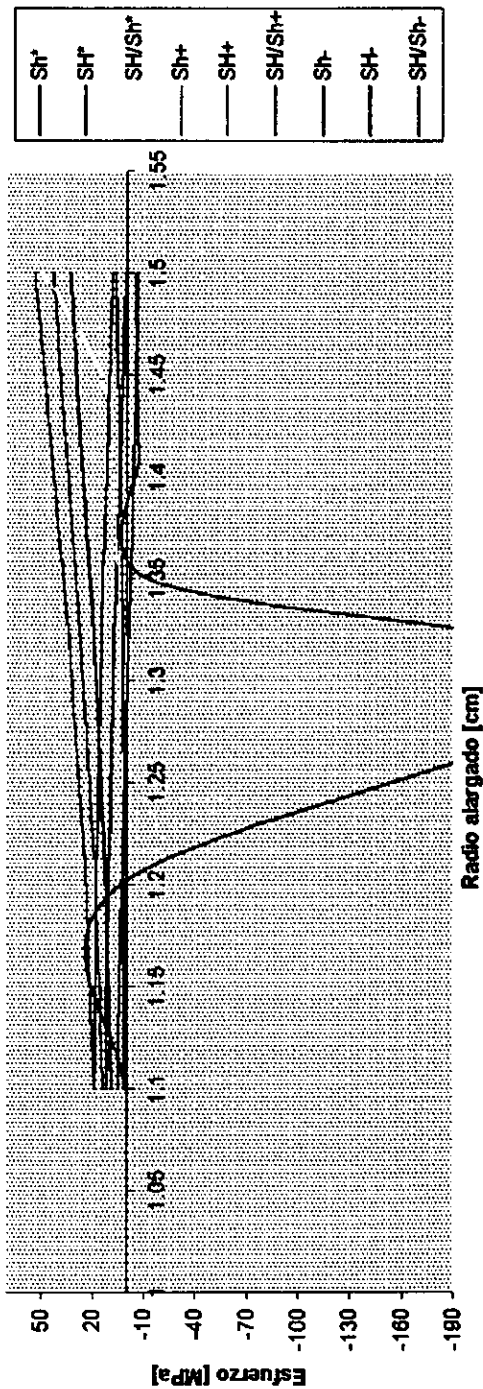
— Sh\* — SH/Sh\*

r	DP=0			DP=2.5			DP=-2.5		
	Sh*	SH*	SH/SH*	Sh+	SH+	SH/SH+	Sh-	SH-	SH/SH-
1.1	12.2	13.4	1.1	19.2	18.4	0.95	5.2	8.5	1.6
1.2	10.5	17.9	1.7	18.1	23.7	1.3	2.9	12.2	4.1
1.3	7.8	25.1	3.2	15.7	32.1	2	-0.06	18.1	-298.4
1.35	6.1	29.5	4.8	14.1	37.4	2.6	-1.8	21.7	-12.1
1.41	3.9	35.2	8.8	11.8	44.1	3.7	-3.9	26.4	-6.8
1.45	2.5	38.9	15.3	10.3	48.5	4.7	-5.22	29.5	-5.7
1.5	0.8	43.4	48.9	8.4	53.7	6.4	-6.6	33.1	-5

Resistencia cohesiva de la roca=7.58 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.54  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Angulo de la ovalidad=38.5°  
 Esfuerzos y DP en MPa

- \* Para DP=0
- + Para DP=2.5
- Para DP=-2.5

Gráfica 6.8 Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad

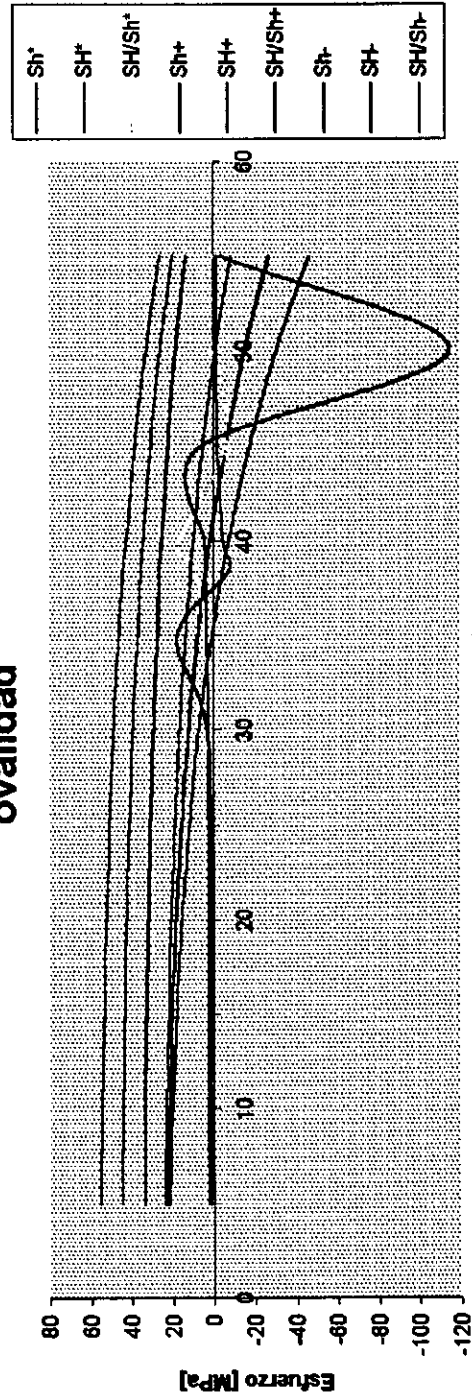


Teta	DP=0			DP=2.5			DP=-2.5		
	Sh*	SH*	SH/Sh*	Sh+	SH+	SH/SH+	Sh-	SH-	SH/SH-
5	23	44.8	1.9	24	55.1	2.3	22	34	1.54
10	22.2	44.2	1.98	23.5	54.7	2.36	20.9	33.7	1.6
20	18.9	42.6	2.25	21.4	52.7	2.46	16.4	32.4	1.97
30	12.6	39.5	3.1	17.3	49	2.8	7.8	29.9	3.8
35	7.9	37.2	4.7	14.4	46.4	3.2	1.5	27.9	18.3
38.5	3.97	35.2	8.9	11.8	44.1	3.7	-3.8	26.4	-6.8
40	2.06	34.3	16.7	10.6	42.9	4.1	-6.5	25.6	-3.9
45	-5.4	30.6	-5.6	5.8	38.6	6.6	-16.7	22.6	-1.35
50	-14.8	25.9	-1.7	-0.2	33.1	-114.5	-29.6	18.7	-0.63
55	-26.9	19.9	-0.7	-7.9	26.1	-3.3	-45.9	13.9	-0.3

Resistencia cohesiva de la roca=7.5 MPa  
 Coeficiente de fricción=0.54  
 Radio de la bna.=1.07 cm  
 Radio alargado=1.41 cm  
 Esfuerzos y DP en MPa  
 r en cm  
 Teta en grados

\* Para DP=0  
 + Para DP=2.5  
 - Para DP=-2.5

Gráfica 6.9 Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad



Analizando los resultados obtenidos y comparándolos con el ejemplo real se concluye:

a) El programa da buenos resultados y muy próximos a lo real en cuanto a  $r_b$  se refiere.

b) Para  $\theta_b$  no se puede decir lo mismo ya que su comportamiento varia y en algunas ocasiones se aleja mucho de lo real.

c) La variación de  $\Delta P$  como se esperaba ocasiona un aumento o disminución en los esfuerzos horizontales.

d) Como un método alternativo el programa podría dar resultados importantes cuando no se tenga o no se pueda aplicar otro método.

## 7. Aplicación del Programa a un Campo de la Zona Marina

El programa completo consta de las dos partes, una que muestra las zonas con ovalidades y su respectivo rumbo y otra donde se calcula la magnitud de los esfuerzos horizontales de dichas zonas.

El análisis completo de ovalidad, magnitud y dirección de esfuerzos se le realizó al pozo Nix-1. Para esto se requirió información adicional a la ya antes mencionada.

El pozo Nix-1 se inició a perforar el 17 de Noviembre de 1995 y terminó el 3 de Septiembre de 1996, sus coordenadas son  $X=622\ 685$  y  $Y=2\ 136\ 797$  y resultó invadido por agua salada. El registro con el que se cuenta corresponde a un SHDT que se tomo en la formación mioceno medio, etapa 11 3/4", perforado con barrena 14 3/4" y un lodo de emulsión inversa de  $1.78\text{ gr/cm}^3$ , el tipo de roca predominante es lutita bentonítica con porosidad promedio de 3%.

El programa se corrió con los siguientes datos:

Número de datos del registro = 4794

Diámetro de barrena = 14 3/4"

Porosidad de la roca = 3% (roca bien cementada)

Coefficiente de deslizamiento friccional = 0.8

Diferencia de presión entre el pozo y la formación = 0 MPa

Las tablas 7.1 muestran los resultados obtenidos con el programa, en estas se pueden observar las zonas con ovalidad, su respectivo rumbo y la diferencia de esfuerzos.

Analizando la magnitud y rumbo de los esfuerzos obtenidos, se puede decir que en el pozo Nix-1, en la formación mioceno medio se tiene un esfuerzo horizontal mínimo promedio de 11.205 MPa (1624.725 psi) con un rumbo promedio de  $53.24^\circ$  SW ( $53^\circ 14'$  SW), y un esfuerzo horizontal máximo promedio de 12.193 MPa (1767.985 psi) con un rumbo promedio de  $36.77^\circ$  NW ( $36^\circ 46'$  NW).

La gráfica 7.1 muestra la magnitud de los esfuerzos horizontales con respecto a la profundidad.

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

PROF	P1AZ	C1	C2	OVAL	RBO	--	SHMIN	SHMAX	REL
1760.281	349.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.362	349.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.443	339.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.525	335.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.606	331.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.687	326.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.769	321.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.85	316.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1760.931	312.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.012	312.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.094	313.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.175	315.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.256	316.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.338	326.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.419	331.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.5	332.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.581	335.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.663	336.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.744	336.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.825	338.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.907	338.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1761.988	333.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.069	333.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.15	332.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.232	329.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.313	331.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.394	331.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.475	325.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.557	323.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.638	320.875	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.719	318.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.801	316.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.882	316.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1762.963	313.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.044	315.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.126	315.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.207	313.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.288	313.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.37	313.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.451	309.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.532	306.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.613	308.125	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.695	309.625	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0
1763.776	312.375	15.008	15.008	0	0	--	0	0	0

Tabla 7.1 Resultados del programa



Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1829.288	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.369	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.45	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.531	282.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.613	279.375	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.694	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.775	286.375	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.857	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1829.938	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.019	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.1	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.182	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.263	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.344	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.426	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.507	286.375	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.588	286.375	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.669	283.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.751	285.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.832	285.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.913	282.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1830.995	285.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1831.076	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.157	283.625	14.93	14.688	1	76.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.238	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.32	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.401	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.482	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.563	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.645	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.726	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.807	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.889	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1831.97	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.051	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.132	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.214	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.295	286.625	14.93	14.688	1	73.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.376	286.625	14.93	14.688	1	73.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.458	283.625	14.93	14.688	1	76.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.539	285.125	14.93	14.688	1	74.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1832.62	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1832.701	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1832.783	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1832.864	285.125	15.008	14.688	1	74.875	NW	10.8804	11.56825	1.063219

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1837.416	287.875	15.156	14.688	1	72.125	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.497	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.578	283.625	15.156	14.688	1	76.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.66	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.741	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.822	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.903	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1837.985	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.066	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.147	287.875	15.156	14.688	1	72.125	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.229	286.625	15.156	14.688	1	73.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.31	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.391	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.472	286.375	15.156	14.688	1	73.625	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.554	285.125	15.156	14.688	1	74.875	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.635	286.625	15.156	14.688	1	73.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.716	286.625	15.156	14.688	1	73.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.797	286.625	15.156	14.773	0	0	--	0	0	0
1838.879	286.625	15.156	14.688	1	73.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1838.96	286.625	15.156	14.688	1	73.375	NW	11.047	12.10462	1.095738
1839.041	283.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1839.123	287.875	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1839.204	289.375	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1839.285	286.375	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1839.366	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.448	287.875	14.93	14.688	1	72.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.529	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.61	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.692	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.773	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.854	286.375	14.93	14.688	1	73.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1839.935	289.375	14.93	14.688	1	70.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1840.017	286.375	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.098	286.375	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.179	289.375	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.26	287.875	15.156	15.008	0	0	--	0	0	0
1840.342	286.375	15.156	15.008	0	0	--	0	0	0
1840.423	287.875	15.008	14.852	0	0	--	0	0	0
1840.504	286.375	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1840.586	286.375	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1840.667	287.875	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.748	287.875	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.829	286.375	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.911	287.875	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1840.992	287.875	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1845.544	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1845.625	290.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1845.706	293.625	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1845.787	293.625	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1845.869	290.625	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1845.95	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.031	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.113	289.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1846.194	290.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1846.275	293.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1846.356	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1846.438	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.519	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.6	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.682	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.763	293.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.844	290.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1846.925	290.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.007	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.088	292.125	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1847.169	290.625	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1847.251	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.332	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.413	290.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.494	292.125	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.576	293.625	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.657	290.625	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1847.738	293.625	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1847.82	293.625	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.901	290.625	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1847.982	292.125	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.063	293.625	15.086	14.688	1	66.375	NW	10.96616	11.84446	1.080092
1848.145	293.625	15.086	14.688	1	66.375	NW	10.96616	11.84446	1.080092
1848.226	292.125	15.086	14.688	1	67.875	NW	10.96616	11.84446	1.080092
1848.307	293.625	15.086	14.688	1	66.375	NW	10.96616	11.84446	1.080092
1848.388	292.125	15.086	14.688	1	67.875	NW	10.96616	11.84446	1.080092
1848.47	292.125	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.551	293.625	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.632	292.125	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.714	292.125	15.156	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.795	295.125	15.156	14.773	0	0	--	0	0	0
1848.876	293.625	15.086	14.852	0	0	--	0	0	0
1848.957	292.125	15.086	14.852	0	0	--	0	0	0
1849.039	293.625	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1849.12	292.125	15.086	14.688	0	0	--	0	0	0

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1857.736	295.125	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
1857.817	295.125	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1857.898	297.875	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
1857.979	297.875	15.008	14.688	1	62.125	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.061	296.375	15.008	14.688	1	63.625	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.142	296.375	15.008	14.688	1	63.625	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.223	297.875	15.008	14.688	1	62.125	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.305	295.125	15.008	14.688	1	64.875	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.386	296.375	15.008	14.688	1	63.625	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1858.467	297.875	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1858.548	297.875	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1858.63	296.375	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1858.711	296.375	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
1858.792	296.375	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1858.874	296.375	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1858.955	297.875	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1859.036	297.875	14.93	14.688	1	62.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.117	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.199	297.875	15.008	14.688	1	62.125	NW	10.8804	11.56825	1.063219
1859.28	297.875	14.93	14.688	1	62.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.361	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.443	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.524	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.605	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.686	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.768	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.849	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1859.93	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.011	296.625	14.93	14.688	1	63.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.093	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.174	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.255	296.375	14.93	14.688	1	63.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.337	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.418	296.625	14.844	14.688	0	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1860.499	297.875	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1860.58	296.375	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1860.662	296.375	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1860.743	297.875	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1860.824	295.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1860.906	295.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1860.987	297.875	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1861.068	297.875	14.93	14.688	1	62.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1861.149	295.125	14.93	14.688	1	64.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1861.231	296.625	14.93	14.688	1	63.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1861.312	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931

1882.12	292.125	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1882.201	290.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1882.282	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1882.364	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1882.445	290.625	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1882.526	292.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1882.607	293.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1882.689	292.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1882.77	295.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1882.851	295.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1882.932	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1883.014	292.125	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1883.095	293.625	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
1883.176	290.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.258	293.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.339	293.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.42	290.625	14.844	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.501	292.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.583	292.125	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.664	290.625	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
1883.745	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1883.827	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1883.908	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1883.989	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.07	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.152	292.375	14.93	14.688	1	67.625	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.233	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.314	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.396	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.477	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.558	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.639	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.721	290.875	14.93	14.688	1	69.125	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.802	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.883	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1884.964	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.046	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.127	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.208	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.29	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.371	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.452	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.533	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.615	293.625	14.93	14.688	1	66.375	NW	10.79899	11.30579	1.046931
1885.696	292.125	14.93	14.688	1	67.875	NW	10.79899	11.30579	1.046931

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1943.08	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.161	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.242	253.438	15.156	14.688	1	73.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.323	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.405	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.486	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.567	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.649	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.73	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.811	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.892	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1943.974	253.438	15.156	14.688	1	73.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.055	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.136	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.218	251.938	15.086	14.688	1	71.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1944.299	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.38	250.562	15.086	14.609	1	70.562	SW	10.69115	11.75795	1.099784
1944.461	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.543	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1944.624	249.062	15.086	14.688	1	69.062	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1944.705	251.938	15.086	14.688	1	71.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1944.786	251.938	15.086	14.688	1	71.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1944.868	250.562	15.086	14.688	1	70.562	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1944.949	251.938	15.086	14.688	1	71.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1945.03	251.938	15.086	14.688	1	71.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1945.112	250.562	15.086	14.688	1	70.562	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1945.193	250.562	15.086	14.688	1	70.562	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1945.274	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.355	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.437	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.518	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.599	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.681	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.762	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.843	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1945.924	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.006	250.438	15.156	14.688	1	70.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.087	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.168	250.562	15.156	14.688	1	70.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.25	251.938	15.156	14.688	1	71.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.331	250.438	15.156	14.688	1	70.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.412	250.438	15.156	14.688	1	70.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.493	250.438	15.156	14.688	1	70.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.575	249.062	15.156	14.688	1	69.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1946.656	250.438	15.156	14.688	1	70.438	SW	11.047	12.10462	1.095738

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1971.528	236.062	15.086	14.688	1	56.062	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1971.609	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1971.69	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1971.771	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1971.853	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1971.934	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.015	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.097	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.178	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.259	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.34	233.312	15.086	14.688	1	53.312	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.422	236.062	15.086	14.688	1	56.062	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.503	236.062	15.086	14.688	1	56.062	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.584	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.666	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.747	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.828	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.909	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1972.991	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.072	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.153	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.235	236.188	15.086	14.688	1	56.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.316	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.397	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.478	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.56	233.312	15.086	14.688	1	53.312	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.641	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.722	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.803	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.885	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1973.966	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.047	231.812	15.086	14.688	1	51.812	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.129	231.812	15.086	14.688	1	51.812	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.21	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.291	233.312	15.086	14.688	1	53.312	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.372	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.454	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.535	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.616	233.188	15.086	14.688	1	53.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.698	234.688	15.086	14.688	1	54.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
1974.779	233.188	15.156	14.688	1	53.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
1974.86	231.812	15.156	14.688	1	51.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
1974.941	234.688	15.156	14.688	1	54.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
1975.023	234.688	15.156	14.688	1	54.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
1975.104	231.812	15.156	14.688	1	51.812	SW	11.047	12.10462	1.095738

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

1991.848	223.062	15.25	14.688	1	43.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1991.929	226.062	15.25	14.688	1	46.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1992.01	226.062	15.25	14.688	1	46.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1992.092	224.562	15.25	14.688	1	44.562	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1992.173	224.688	15.156	14.688	1	44.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.254	226.062	15.156	14.688	1	46.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.335	223.062	15.156	14.688	1	43.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.417	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.498	227.562	15.156	14.688	1	47.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.579	225.938	15.156	14.688	1	45.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.661	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.742	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.823	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.904	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1992.986	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.067	223.062	15.156	14.688	1	43.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.148	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.229	227.562	15.156	14.688	1	47.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.311	227.562	15.156	14.688	1	47.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.392	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.473	227.562	15.156	14.688	1	47.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.555	225.938	15.156	14.688	1	45.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.636	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.717	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.798	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.88	223.062	15.156	14.688	1	43.062	SW	11.047	12.10462	1.095738
1993.961	224.562	15.156	14.688	1	44.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
1994.042	224.562	15.25	14.688	1	44.562	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.124	223.062	15.25	14.688	1	43.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.205	225.938	15.25	14.688	1	45.938	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.286	225.938	15.25	14.688	1	45.938	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.367	223.062	15.25	14.688	1	43.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.449	223.062	15.25	14.688	1	43.062	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.53	224.562	15.25	14.688	1	44.562	SW	11.16167	12.47333	1.117515
1994.611	221.562	15.328	14.688	1	41.562	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1994.693	224.562	15.328	14.688	1	44.562	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1994.774	224.562	15.328	14.688	1	44.562	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1994.855	223.062	15.328	14.688	1	43.062	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1994.936	224.562	15.328	14.688	1	44.562	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.018	224.562	15.328	14.688	1	44.562	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.099	223.062	15.328	14.688	1	43.062	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.18	223.062	15.328	14.688	1	43.062	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.261	225.938	15.328	14.688	1	45.938	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.343	223.062	15.328	14.688	1	43.062	SW	11.26243	12.79706	1.136261
1995.424	223.062	15.328	14.688	1	43.062	SW	11.26243	12.79706	1.136261



Aplicación del programa a un campo de la zona marina

2028.424	212.938	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2028.505	213.062	15.008	14.688	1	33.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2028.586	215.938	15.008	14.688	1	35.938	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2028.667	211.562	15.086	14.688	1	31.562	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2028.749	211.562	15.086	14.688	1	31.562	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2028.83	214.438	15.086	14.688	1	34.438	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2028.911	211.562	15.008	14.688	1	31.562	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2028.993	213.062	15.008	14.688	1	33.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2029.074	214.438	15.086	14.688	1	34.438	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2029.155	211.562	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.236	211.562	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.318	214.438	15.008	14.688	1	34.438	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2029.399	212.938	15.008	14.688	1	32.938	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2029.48	211.562	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.562	214.438	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.643	213.062	15.086	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.724	212.938	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.805	214.438	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.887	213.062	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2029.968	211.562	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2030.049	214.438	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2030.131	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2030.212	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2030.293	214.438	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2030.374	214.438	15.008	14.688	1	34.438	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2030.456	211.562	15.008	14.688	1	31.562	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2030.537	213.062	15.008	14.688	1	33.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2030.618	213.062	15.008	14.688	1	33.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2030.699	211.562	15.008	14.688	1	31.562	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2030.781	211.562	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2030.862	211.562	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2030.943	210.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.025	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.106	213.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.187	211.562	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2031.268	213.062	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2031.35	213.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.431	210.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.512	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.594	213.062	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2031.675	210.062	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2031.756	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.837	211.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2031.919	210.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2032	210.062	15.008	14.688	1	30.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

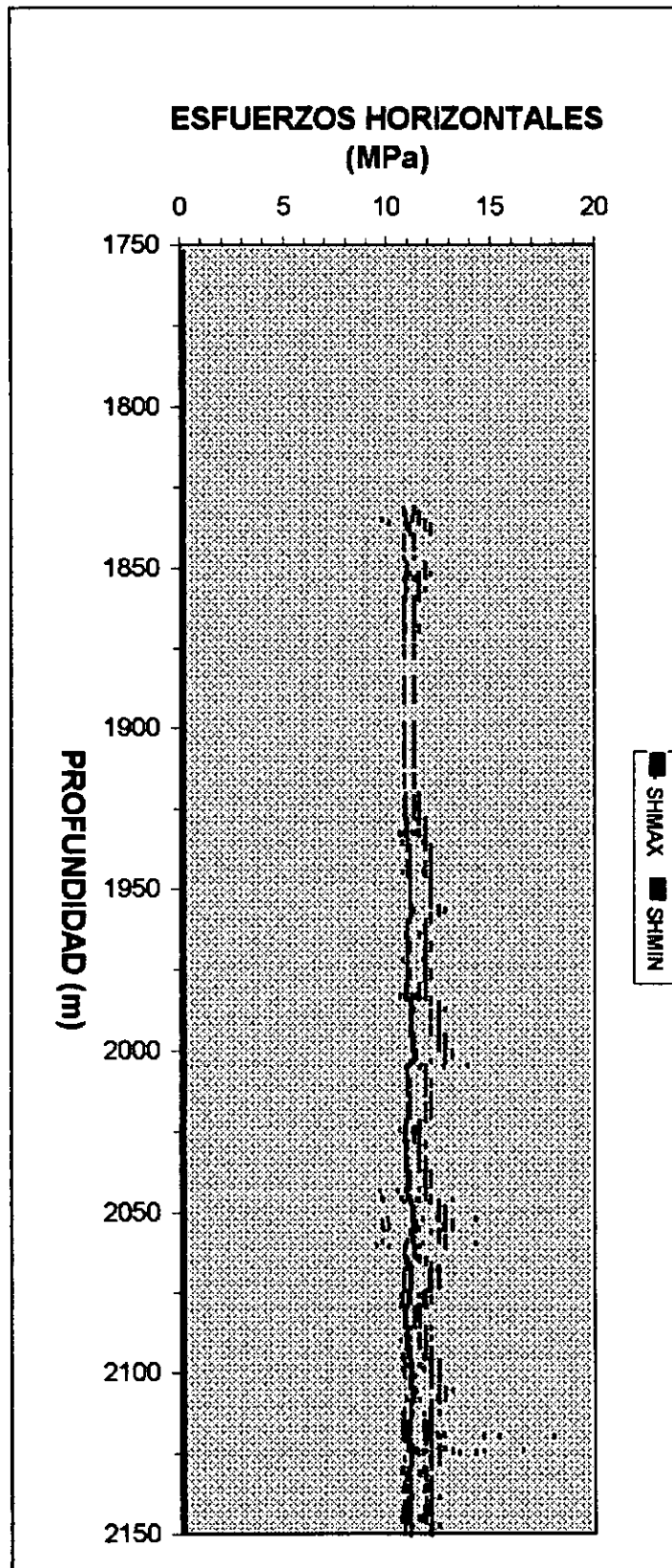
2060.936	195.812	15.25	14.773	0	0	--	0	0	0
2061.017	195.812	15.156	14.93	0	0	--	0	0	0
2061.098	197.188	15.156	14.93	0	0	--	0	0	0
2061.179	197.188	15.156	15.008	0	0	--	0	0	0
2061.261	194.312	15.156	15.008	0	0	--	0	0	0
2061.342	197.188	15.086	14.93	0	0	--	0	0	0
2061.423	195.812	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
2061.505	195.812	14.93	14.773	0	0	--	0	0	0
2061.586	195.812	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
2061.667	197.188	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
2061.749	195.812	14.93	14.688	0	0	--	0	0	0
2061.83	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2061.911	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2061.992	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.073	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.155	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.236	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.317	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.399	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.48	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.561	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.643	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.724	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.805	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.886	198.688	14.93	14.688	1	18.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2062.968	198.688	14.93	14.688	1	18.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.049	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.13	195.688	14.93	14.688	1	15.688	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.211	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.293	197.188	15.008	14.688	1	17.188	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.374	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.455	197.188	14.93	14.688	1	17.188	SW	10.79899	11.30579	1.046931
2063.537	195.688	15.008	14.688	1	15.688	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.618	195.688	15.008	14.688	1	15.688	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.699	198.688	15.008	14.688	1	18.688	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.781	197.188	15.008	14.688	1	17.188	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.862	198.688	15.008	14.688	1	18.688	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2063.943	200.062	15.008	14.688	1	20.062	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2064.024	200.062	15.086	14.688	1	20.062	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2064.106	198.688	15.008	14.773	0	0	--	0	0	0
2064.187	200.062	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2064.268	198.562	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2064.349	195.812	15.008	14.688	0	0	--	0	0	0
2064.431	197.188	15.008	14.688	1	17.188	SW	10.8804	11.56825	1.063219
2064.512	197.188	15.008	14.688	1	17.188	SW	10.8804	11.56825	1.063219

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

2125.96	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.041	217.438	15.156	14.609	1	37.438	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2126.122	215.938	15.156	14.609	1	35.938	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2126.204	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.285	217.438	15.156	14.609	1	37.438	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2126.366	214.438	15.156	14.609	1	34.438	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2126.447	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.529	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.61	214.438	15.156	14.688	1	34.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.691	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.772	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.854	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2126.935	214.438	15.156	14.688	1	34.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.016	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.098	214.438	15.156	14.688	1	34.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.179	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.26	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.342	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.423	214.438	15.156	14.688	1	34.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.504	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.585	214.438	15.25	14.688	1	34.438	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2127.667	214.438	15.25	14.688	1	34.438	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2127.748	215.938	15.25	14.688	1	35.938	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2127.829	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.91	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2127.992	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.073	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.154	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.236	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.317	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.398	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.479	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.561	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.642	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.723	215.938	15.156	14.688	1	35.938	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.804	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.886	217.438	15.156	14.688	1	37.438	SW	11.047	12.10462	1.095738
2128.967	217.312	15.156	14.688	1	37.312	SW	11.047	12.10462	1.095738
2129.048	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2129.13	218.812	15.156	14.688	1	38.812	SW	11.047	12.10462	1.095738
2129.211	217.438	15.086	14.609	1	37.438	SW	10.69115	11.75795	1.099784
2129.292	218.812	15.086	14.609	1	38.812	SW	10.69115	11.75795	1.099784
2129.374	217.438	15.086	14.609	1	37.438	SW	10.69115	11.75795	1.099784
2129.455	215.938	15.086	14.688	1	35.938	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2129.536	217.312	15.086	14.688	1	37.312	SW	10.96616	11.84446	1.080092

Aplicación del programa a un campo de la zona marina

2145.792	220.188	15.086	14.688	1	40.188	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2145.873	221.688	15.086	14.688	1	41.688	SW	10.96616	11.84446	1.080092
2145.955	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2146.036	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
2146.117	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
2146.198	218.688	15.156	14.688	1	38.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
2146.28	218.688	15.156	14.688	1	38.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
2146.361	220.188	15.25	14.773	0	0	--	0	0	0
2146.442	218.688	15.25	14.773	0	0	--	0	0	0
2146.523	218.688	15.328	14.773	0	0	--	0	0	0
2146.605	221.688	15.328	14.773	0	0	--	0	0	0
2146.686	221.688	15.328	14.773	0	0	--	0	0	0
2146.767	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2146.849	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2146.93	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.011	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2147.093	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2147.174	220.188	15.25	14.688	1	40.188	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2147.255	221.562	15.25	14.688	1	41.562	SW	11.16167	12.47333	1.117515
2147.336	221.562	15.156	14.688	1	41.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.417	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.499	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.58	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2147.661	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2147.743	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2147.824	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.905	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2147.987	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.068	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.149	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.23	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.312	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.393	221.688	15.156	14.688	1	41.688	SW	11.047	12.10462	1.095738
2148.474	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2148.555	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.637	221.562	15.156	14.688	1	41.562	SW	11.047	12.10462	1.095738
2148.718	220.188	15.156	14.688	1	40.188	SW	11.047	12.10462	1.095738
2148.799	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.881	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2148.962	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2149.043	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2149.125	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2149.206	220.188	15.156	14.609	1	40.188	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2149.287	218.812	15.156	14.609	1	38.812	SW	10.76382	12.01654	1.116382
2149.368	221.562	15.156	14.609	1	41.562	SW	10.76382	12.01654	1.116382



Gráfica 7.1 Esfuerzos horizontales máximos y mínimos para el pozo Nix-1 (resultados del programa)

## **8. Conclusiones y Recomendaciones**

El conocer el estado de esfuerzos in-situ en determinada área, es una herramienta mas con la cual el ingeniero de diseño podrá apoyarse para poder llegar a un objetivo con el menor tiempo y la mayor eficiencia, es por esto que este trabajo en uno de sus objetivos establece la importancia de contar con la mayor cantidad de información al momento de la planeación de un pozo. En este trabajo se proporciona una fuente alterna para conocer o inferir el estado de esfuerzos, utilizando información que ya se tiene, por lo que no se tendrá que hacer mayor inversión que seleccionar y clasificar el material aprovechable.

El conocer la dirección y magnitud de los esfuerzos horizontales in-situ en un área determinada proporciona al ingeniero herramientas para prevenir y conocer la causa de problemas tales como inestabilidad del pozo, o para casos de fracturamiento hidráulico el conocer dichos esfuerzos proporcionan una idea de la dirección preferencial de la fractura.

Los resultados del programa de cómputo se compararon con datos teóricos, y se observó una muy buena aproximación (de hasta 80%), por lo que se considera que el programa funciona y que la calidad de los resultados que se obtengan dependen de la veracidad de los datos introducidos al programa para el análisis de un pozo. Además, este método podría considerarse como la única forma de estudio in-situ en pozos donde por su estado o antigüedad no permitan el uso de otro método, siendo también mas económico puesto que no requiere de intervenciones especiales.

Se recomienda que la información que se quiera analizar sea lo mas aproximado a la realidad ya que un buen resultado depende de la calidad de los datos; la capacidad de respuesta del programa depende en mucho de la capacidad de la computadora que se utilice.

## Programa de Cómputo

DECLARE SUB ESFUERZO (TETA!, MU!, BNA!, CM!, TAO!, DELP!, SHMIN!, SHMAX!, REL!)

' UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
' DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
' FACULTAD DE INGENIERIA

' PROGRAMA PARA LOCALIZAR Y EVALUAR ZONAS CON OVALIDAD

' AUTOR: ING. CUAUHTEMOC SOTO SANCHEZ  
' DIRECTOR: DR. DANIEL GARCIA GAVITO

CLS  
DIM PROF(10000)

' APERTURA DE ARCHIVO DE DATOS  
OPEN "C:/TEMO/TESIS/NIX1.DAT" FOR INPUT AS #1  
OPEN "C:/TEMO/TESIS/OVALG1.DAT" FOR OUTPUT AS #2

' ENTRADA DE DATOS  
INPUT "NUMERO DE DATOS"; D  
INPUT "DIAMETRO DE BARRENA"; BNA  
INPUT "CONOCES LA RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA (S/N)"; S\$  
IF S\$ = "S" THEN  
INPUT "RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA [MPa]"; TAO  
ELSE

' CALCULO DE LA RESISTENCIA COHESIVA DE LA ROCA  
PRINT "QUE TIPO DE ROCA ES?"  
PRINT " 1) ROCA BIEN CEMENTADA"  
INPUT " 2) ROCA MAL CEMENTADA"; ROC  
INPUT "POROSIDAD DE LA ROCA"; POR  
IF ROC = 1 THEN  
CO = (66889 - 84063 \* LOG(POR) + 26091 \* (LOG(POR)) ^ 2) / 145  
ELSE  
CO = (9953 - 7892 \* LOG(POR) + 1203 \* (LOG(POR)) ^ 2) / 145  
END IF  
TAO = CO / 8  
END IF

' ENTRADA DE DATOS  
INPUT "COEFICIENTE DE DESLIZAMIENTO FRICCIONAL"; MU  
INPUT "DELTA P [MPa]"; DELP



```
' FORMATO DE SALIDA
  WRITE #2, "PROF", "PLAZ", "C1", "C2", "OVAL", "RBO", " --", "SHMIN",
"SHMAX", "REL"

' INICIO DE CICLO
  SUMA = 0
FOR I = 1 TO D
  INPUT #1, PROF, PLAZ, C1, C2

' CONDICIONES PARA QUE EXISTA OVALIDAD
  DIF = ABS(C1 - C2)
  IF DIF > .23622 THEN CON = 1 ELSE CON = 0
  PROF(I) = PROF
  IF CON = 1 THEN
    DIF2 = PROF(I) - PROF(I - 1)
    SUMA = SUMA + DIF2
  IF SUMA >= .3 THEN OVAL = 1 ELSE OVAL = 0
  ELSE
    SUMA = 0
    OVAL = 0
  END IF

  IF C1 AND C2 > BNA THEN
    OVAL = 0
    RBO = 0
    RBO$ = "--"
    SHMIN = 0
    SHMAX = 0
    REL = 0
    GOTO 10
  END IF

' CALCULO DEL ANGULO DE OVALIDAD
  IF OVAL = 1 THEN
    IF C1 > C2 THEN
      CM = C1
      CE = C2
    ELSE
      CM = C2
      CE = C1
    END IF
    X = SQR((((CM / 2) ^ 2 * (CE / 2) ^ 2) - ((CM / 2) ^ 2 * (BNA / 2) ^ 2)) /
((CE / 2) ^ 2 - (CM / 2) ^ 2))
    Y = SQR((BNA / 2) ^ 2 - X ^ 2)
    PHI = ATN(Y / X) * (180 / 3.14159)
    TETA = 90 - PHI

' SUBROUTINA PARA CALCULAR LOS ESFUERZOS HORIZONTALES
  CALL ESFUERZO(TETA!, MU!, BNA!, CM!, TAO!, DELP!, SHMIN!, SHMAX!, REL!)
  ELSE GOTO 10
END IF
```

```

' RUMBO DE LA OVALIDAD CUANDO C1>C2
  IF C1 >= C2 THEN
    IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN RBO$ = "NE"
    IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO$ = "SE"
    IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO$ = "SW"
    IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO$ = "NW"
  END IF

' RUMBO DE LA OVALIDAD CUANDO C2>C1
  IF C2 > C1 THEN
    P1AZ = P1AZ + 90
    IF P1AZ > 360 THEN P1AZ = P1AZ - 360
    IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN RBO$ = "NE"
    IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO$ = "SE"
    IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO$ = "SW"
    IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO$ = "NW"
  END IF

' CALCULO DEL RUMBO EN GRADOS
  IF P1AZ < 90 THEN RBO = P1AZ
  IF 90 < P1AZ AND P1AZ < 180 THEN RBO = 180 - P1AZ
  IF 180 < P1AZ AND P1AZ < 270 THEN RBO = P1AZ - 180
  IF P1AZ > 270 AND P1AZ < 360 THEN RBO = 360 - P1AZ

  IF C2 > C1 THEN
    IF P1AZ < 90 AND P1AZ > 0 THEN P1AZ = P1AZ + 270 ELSE P1AZ = P1AZ - 90
  END IF

' SALIDA DE RESULTADOS
10  WRITE #2, PROF, P1AZ, C1, C2, OVAL, RBO, RBO$, SHMIN, SHMAX, REL
    X = 0: Y = 0: CM = 0: CE = 0: TETA = 0
NEXT I
  CLOSE #1
  CLOSE #2
END

SUB ESFUERZO (TETA!, MU!, BNA!, CM!, TAO!, DELP!, SHMIN!, SHMAX!, REL!)
  R2 = (BNA / 2) ^ 2 / (CM / 2) ^ 2
  R4 = (BNA / 2) ^ 4 / (CM / 2) ^ 4

' CALCULO DE SH Y Sh
  A1 = -MU * (1 - 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))
  A2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 - 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))
  B1 = -MU * (1 + 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))
  B2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 + 2 * COS(2 * TETA / 180 * 3.1416))
  C1 = -MU * (1 + 2 * R2)
  C2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (1 - R2 + 3 * R4)
  D1 = -MU * (1 - 2 * R2)
  D2 = (1 + MU ^ 2) ^ .5 * (-1 + 3 * R2 - 3 * R4)
  E = -(1 + MU ^ 2) ^ .5
  F = -(1 + MU ^ 2) ^ .5 * R2

```

```
' RESULTADOS
  SHMIN = 2 * (((A1 + A2) * (TAO + F * DELP) - (C1 + C2) * (TAO - E * DELP)) /
((A1 + A2) * (D1 + D2) - (B1 + B2) * (C1 + C2)))
  SHMAX = 2 * (((D1 + D2) * (TAO - E * DELP) - (B1 + B2) * (TAO - F * DELP)) /
((A1 + A2) * (D1 + D2) - (B1 + B2) * (C1 + C2)))
  REL = SHMAX / SHMIN

END SUB
```

**Nomenclatura**

$\sigma_r$	Esfuerzo radial, MPa
$\sigma_\theta$	Esfuerzo circunferencial, MPa
$\tau_{r\theta}$	Esfuerzo de corte tangencial, MPa
R	Radio del agujero, cm o pg
r	Radio alargado por elongación, cm o pg
SH	Máximo esfuerzo horizontal, MPa
Sh	Mínimo esfuerzo horizontal, MPa
$\tau_o$	Resistencia cohesiva de la roca, MPa
$\mu$	Coefficiente de fricción, adimensional
$\theta$	Angulo de intersección entre el agujero y la ovalidad, grados
Co	Resistencia compresiva uniaxial, MPa
Pp	Presión de poro, MPa
Pw	Presión hidrostática, MPa
$\Delta P$	Diferencia de presión entre la formación y el pozo, MPa
$\phi$	Porosidad de la roca, porciento

## Lista de Figuras, Tablas y Gráficas

<b>Figura</b>		<b>Pagina</b>
3.1	Grafica de tiempo vs presión para una prueba de fracturamiento hidráulico.	5
3.2	Herramienta extensometro de agujero.	6
3.3	Registro de imágenes FMI.	9
3.4	Registro de geometría de agujero.	3.4
4.1	Registro TelevIEWER	16
4.2	Sección de un registro televIEWER y de una ovalidad	17
4.3	Ovalidades en un pozo en Auburn, New York	18
4.4	Ovalidades en un pozo en Monticello, Carolina	18
4.5	Ovalidades en un pozo en Nevada	19
4.6	Comparación de ovalidades y pruebas de fracturamiento	20
4.7	Diagrama de longitud de ovalidades	20
4.8	Orientación de las superficies potenciales de falla.	22
4.9	Tamaños teóricos de ovalidades	23
4.10	Relación entre radios de ovalidad y relación de esfuerzos	26
4.11	Efecto de la presión en la ovalidad	27
4.12	Configuraciones del agujero para diferentes condiciones.	30
5.1	Ejemplos de registros de calibración y la común interpretación de la geometría del agujero	36

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
4.1	Coefficientes de fricción de rocas y minerales	28-29
5.1	Resultados del programa	45
6.1	Dimensiones experimentales de ovalidades	60
6.2	Comparación de resultados experimentales y teóricos	66
7.1	Resultados del programa	74

<b>Gráfica</b>		<b>Página</b>
6.1	Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad para DP=0	61
6.2	Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad para DP=0	62
6.3	Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad	63
6.4	Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad	64
6.5	Resistencia cohesiva de la roca vs. Esfuerzos in-situ	65
6.6	Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad para DP=0	67
6.7	Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad para DP=0	68
6.8	Variación de los esfuerzos in-situ con el radio de la ovalidad	69
6.9	Variación de los esfuerzos in-situ con el ángulo de la ovalidad	70
7.1	Esfuerzos horizontales máximos y mínimos (resultados del programa)	87

## Referencias Bibliográficas

1. Aleksandrowski Z. y O.H.Inderhaug, "Tectonic structures and wellbore breakout orientation", Proceedings 33 th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, 1992.
2. Blumling, P., K. Fuchs, and T. Schneider, "Orientation of the Stress Field from Breakouts in a Crystalline Well in a Seismic Active Area", Phys. Earth Planetary Interiors, 33, 250-254, 1983.
3. Brumley, J., Christiansen, C., Jorgensen, L.N.: "In-Situ Stress Field Determination and Formation Characterization-Offshore Qatar Case History", Eurock 94, Rock Mechanics in Petroleum Engineering, 1994.
4. Byerlee, J.D. "Friction of Rocks", Pure Appl. Geophys., 116. p615-626. 1978.
5. Garcia, G.D., "A new rock strength model and its practical applications", SPE 35322, 1996.
6. Germanovich, L.N., Reegiers, J.C., Dyskin, A.V.: "A Model for Borehole Breakouts in Brittle Rocks", Eurock 94, Rock Mechanics in Petroleum Engineering, 1994.
7. Haimson, B.C. "Status of in situ stress determination methods", Key questions in rock mechanics", Balkema, Rotterdam, 1988.
8. Haimson, B.C. y C.G. Herrick 1985, "In situ Stress evaluation from borehole breackouts, experimental studies". Proceedings 26 th U.S. Symposium on Rock Mechanics, p. 1207-1218, Rotterdam: Balkema.
9. Hansen, K.S. "Comparison between field observations and theory for stress-induced borehole ellipticity", Rock mechanics as a multidisciplinary science, Balkema, Rotterdam, 1991.
10. Healy J. H., Hickman S. H. and Zoback M. D.: "Deep Borehole Stress Measurements at the Nevada Test Site" Eos Trans. AGU, 63, 1099, 1982.

11. Hickman S. H., Healy J. H. and Zoback M. D.: "In Situ Stress, Natural Fracture Distribution, and Borehole Elongation in the Auburn Geothermal Well, Auburn, New York", *Journal of Geophysical Research*, vol.90, no.B7, 5497-5512, June 10 1985.
12. Hickman S. H., Healy J. H., Zoback M.D.: " In situ Stress, Borehole Elongation , and Natural Fracture Distribution at Depth in Central New York State", *Eos Trans. AGU*, 63, 1118, 1982.
13. Jaeger, J.C., and N.G.W. Cook: "Fundamentals of Rock Mechanics", Chapman and Hall, London 1979.
14. Jaeger, J.C.: "Elasticity, Fracture and Flow", 212 pp., Methuen , London, 1961.
15. Jaeger, J.C.: "Rock Mechanics and Engineering", Chapman and Hall, London 1979.
16. Lawrence W. T. 1985, "Insights into the relationship between wellbore breackouts, natural fractures and in situ stress". *Proceedings 26 th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, p. 1199-1205.
17. Lehene, K.A., Aadnoy, B.S.: "Quantitative Analysis of Regimes and Fractures from Logs and Drilling Records of a North Sea Chalk Field" *The log Analyst*, July-August, 1992.
18. Maloney, S. y P.K. Kaiser, "Results of borehole breakout simulation tests", *Rock at great depth*, Balkema, Rotterdam, 1989.
19. Martin, C.D., Martino, J.B., Dzik, E.J.: "Comparison of Borehole Breakouts from Laboratory and Field Test", *Eurock 94, Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, 1994.
20. Mastin L: " Effect of Borehole Deviation on Breakout Orientations", *Journal of Geophysical Research*, vol.93, no.B8, 9187-9195, 1988.
21. Moos, D. y M. D. Zoback. "Utilization of observations of wellbore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: application to



- continental continental, deep sea drilling project, and ocean drilling program boreholes". *J. Geophys. Res.* 95:9305-9325. 1990.
22. Nathan, D. Meehan: "Rock Mechanics Issues in Petroleum Engineering", *Rock Mechanics*, 1994.
23. Paillet F. L. and Kunsoo K.: "Character and Distribution of Borehole Breakouts and Their Relationship to in Situ Stresses in Deep Columbia River Basalts", *Journal of Geophysical Research*, vol.92, no.B7, 6223-6234, 1987.
24. Plumb R. A., "Breakouts in the Geothermal Well, Auburn, N. Y.", *Eos Trans. AGU*, 63, 1118, 1982.
25. Plumb, R. A., and S. H. Hickman: "Stress Induced Borehole Elongation: A Comparison Between the Four Arm Dipmeter and the Borehole Televiwer in the Auburn Geothermal Well", *Journal of Geophysical Research*, vol.90, no.B7, 5513-5521, 1985.
26. Springer, J.A. "Stress orientations from wellbore breakouts in the Coalinga region". *Tectonics* 6:667-676, 1987.
27. Vernik, L., y M.D. Zoback, "Strength anisotropy in crystalline rock: Implications for assessment of in situ stresses from wellbore breakouts", *Rock Mechanics Contributions and Challenges*, 1990 Balkema, Rotterdam..
28. Werner, K.S., E.P. Graven, T.A. Berkman y M.J. Parker. "Direction of maximum horizontal compression in Western Oregon determined by borehole breakouts". *Tectonics* 10:948-958, 1991.
29. Yassir, N. A. y M.B. Dusseault, "Stress trajectories in southwestern Ontario using wellbore breakout orientations", *Rock mechanics as a multidisciplinary science*, Balkema, Rotterdam, 1991.
30. Zheng, Z., J. Kemeny y N.G.W. Cook. "Analysis of borehole breakouts", *Journal of Geophysical Research*, vol.94, 7171-7182, 1989.
31. Zheng, Z., y N.G.W. Cook. "Borehole breakouts and stress measurements", *Key questions in rock mechanics*, Balkema, Rotterdam, 1988.

32. Zoback, M.D., Moos, D. y Mastin, L.: "Well Bore Breakouts and In-Situ Stress", U.S. Geological Survey, 1985.
33. Zoback, M.D., Moos, D., " Determination of the Horizontal Principal Stresses from Wellbore Breakout", Eos Trans. AGU, 63, 1118, 1982.