

01131  
11  
1

Envío a la Dirección General de Planeación y Evaluación para difundir en formato electrónico el contenido de mi trabajo receptor.

NOMBRE: ANTONIO MATEO MORALES SOTO  
FECHA: 08 JULIO 03  
FIRMA: [Firma]

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

SÍSMICA DE REFLEXIÓN EN LA DETECCIÓN DE  
PRESIONES ANORMALES EN POZOS, APLICACIÓN DEL  
MÉTODO VELAN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO GEOFÍSICO  
P R E S E N T A:  
ANTONIO MATEO MORALES SOTO

DIRECTOR  
ING. MARCO ANTONIO FLORES FLORES

CIUDAD UNIVERSITARIA

2003

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 esta 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  
DE INGENIERIA  
AV. MAESTRO  
MATEO

SR. ANTONIO MATEO MORALES SOTO  
Presente

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-1211

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Marco A. Flores Flores y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**SÍSMICA DE REFLEXIÓN EN LA DETECCIÓN DE PRESIONES ANORMALES EN POZOS, APLICACIÓN DEL MÉTODO VELAN**

- I INTRODUCCIÓN
- II ANTECEDENTES TEÓRICOS
- III ORIGEN DE LAS PRESIONES ANORMALES EN LAS FORMACIONES
- IV MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LAS PRESIONES ANORMALES
- V ANÁLISIS DEL MÉTODO SÍSMICO PARA DETERMINAR LAS PRESIONES ANORMALES
- VI APLICACIÓN DEL MÉTODO
- VII CONCLUSIONES
- VIII BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitario, U.F., a 3 de octubre de 2002  
EL DIRECTOR

~~ING. GERARDO FERRANDO BRAVO~~

GFB\*RLLR\*ggg

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**DEDICATORIA**

A mi esposa **CLAUDIA ISABEL**  
por su inagotable paciencia y amor  
a mi persona

A mi hijo **DAVID ANTONIO**  
por su continua enseñanza  
y creatividad

A mis queridos viejitos  
**JUANITA Y EMILIANO**  
Por su ejemplo y motivación

A mis hermanos **CARLOS, PILAR**  
**MIGUEL**, y principalmente a  
**ANDRES, PEPE, VIVIS** y donde  
quiera que este a **REV DAVID**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero MARCO ANTONIO FLORES FLORES  
por su paciencia y tiempo dedicados a este trabajo.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
Por todas las facilidades y grandeza para forjar profesionistas.

A la UNIVERSIDAD HISPANOAMERICANA  
Por su apoyo y confianza

Al Dr. JOSE HECTOR SANDOVAL OCHOA  
Ing. HECTOR RICARDO CASTREJON PINEDA  
Ing. ENRIQUE DEL VALLE TOLEDO  
Ing. EDUARDO AMADOR TERRAZAS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## R E S U M E N

Como principal objetivo a presentar en este trabajo esta el hecho de poder predecir las zonas de alta presión en la columna sedimentaria, las cuales representan un riesgo potencial al momento de la perforación exploratoria, así como proteger la economía y tener cuidado con lo que es insustituible, la vida del ser humano, utilizando las metodologías de la sísmica de reflexión y principalmente del Análisis de Velocidad que es un estudio de la velocidad de la onda sísmica en el subsuelo para la búsqueda de prospectos petroleros.

Así el trabajo de tesis establece inicialmente la información teórica básica para la comprensión de lo que es la sísmica de reflexión y las presiones tratando conceptos como la definición misma de la presión, trayectorias de reflexión, determinación de la velocidad por método de reflexión y el detalle de la determinación del cálculo automático de la velocidad, VELAN.

Enseguida a partir de los fenómenos geológicos sedimentarios interpretativos del subsuelo, el trabajo se enfoca en dar a conocer cuales son las causas más frecuentes por las que se origina la presión anormal, en las zonas geopresurizadas asociadas a yacimientos de petróleo.

La metodología que se utiliza para determinar o conocer estas zonas de alta presión, se expone adelante de una manera muy breve y se da la pauta para introducir el método de estudio que es de nuestro interés para la evaluación de las presiones anómalas para su control y para su dominio en el fracturamiento de las rocas en el subsuelo.

Finalmente se da la teoría del método VELAN y su aplicación en un problema práctico, cuyos resultados fueron analizados localmente en las formaciones de la Sonda de Campeche, que después de una discusión se plantean algunas conclusiones y contribuciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS  
FALLA  
DE  
ORIGEN**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	2
I.1 Método de reflexión sísmica.....	3
I.2 Geometría de las trayectorias de la reflexión.....	3
I.3 Factores que afectan la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.....	12
I.4 Ley de velocidad de la onda sísmica.....	18
I.5 Determinación de la velocidad de propagación por método de Reflexión.....	20
I.6 Procedimiento para construir las gráficas de velocidad de intervalo y el tiempo de tránsito contra la profundidad.....	27
I.7 Determinación automática de la velocidad.....	33
I.8 Tipos de presión.....	37
CAPITULO II. ORIGEN DE LAS PRESIONES ANORMALES EN LAS FORMACIONES.....	41
II.1 Presión debida a una columna de agua.....	42
II.2 Fenómeno de compactación.....	42
II.3 El fenómeno de Osmosis.....	43
II.4 Cambios de temperatura.....	43
II.5 Precipitación secundaria o cementación.....	44
CAPITULO III. MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LAS PRESIONES ANORMALES.....	45
III.1 Historia de lodos de perforación y reporte de pozos ya perforados..	45
III.2 Correlación geológica.....	45
III.3 Evaluación con registros geofísicos de pozos.....	46
CAPITULO IV. ANALISIS DEL MÉTODO SÍSMICO PARA DETERMINAR LAS PRESIONES ANORMALES.....	52
IV.1 Antecedentes del método de estudio.....	52
IV.2 Método de Pennebaker.....	52
IV.3 Método de Ben Eaton.....	57
IV.4 Método para determinar el gradiente de sobrecarga con datos sísmicos (velocidad de intervalo).....	65
IV.5 Metodología para predecir y cuantificar las zonas de alta Presión.....	66
CAPITULO V. APLICACIÓN DEL MÉTODO.....	68
V.1 Procedimiento de cálculo.....	69
V.2 Aplicación del método en la práctica.....	77
CAPITULO VI. CONCLUSIONES.....	86
BIBLIOGRAFIA.....	88

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INTRODUCCIÓN

Como una surgiente necesidad para el desarrollo económico de nuestro país, las ramas de la ingeniería toman un importante papel, es por este motivo que la ingeniería geofísica contribuye a esta importante tarea ayudando a la exploración y explotación de formaciones geológicas de recursos energéticos, pero conforme pasa el tiempo, los métodos de la prospección hasta ahora conocidos, cada vez son más sofisticados, debido a que los prospectos ya no se encuentran a unos cuantos metros de profundidad, sino a unos cientos o miles de metros; no es tan solo el hecho de encontrar o determinar la posible zona de explotación, sino la de evitar también gastos infructuosos en el desarrollo de la misma.

Enfocándose primordialmente en la explotación de hidrocarburos es indispensable el elaborar programas de explotación en la cual es necesario considerar la situación del pozo. Uno de los problemas que se tienen en la economía de la explotación es el de la alta presión en la formación, ya que debido a ésta se puede detener por completo la perforación o resultar en algo que puede ser irremediable en un reventón de pozo, la pérdida de vidas humanas; por ello es necesario el tener que determinar la ubicación de zonas de presión anómala en las formaciones en las cuales se realizará la explotación; gracias a métodos geofísicos, es posible efectuar el estudio de estas zonas y predecirlas.

La finalidad particular de este trabajo es la de presentar métodos sencillos y eficaces para la detección de zonas de presión anormal basados en el método de sismología de reflexión, particularmente lo que es el registro VELAN o comúnmente conocido como Registro de Análisis de Velocidad. Lo interesante del método es que determina las posibles zonas de alta presión desde antes de que se realice alguna perforación de pozo de exploración.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO I.- ANTECEDENTES TEORICOS

Para una mejor comprensión del trabajo a desarrollar, daremos en este capítulo, algunos conceptos básicos.

**Sistema**.- Es la porción limitada del espacio de volumen y masa no necesariamente constantes, de la cual se estudian las variaciones de masa y/o energía para el análisis de un problema.

**Presión**.- Se define como la capacidad de un sistema para producir una fuerza normal contra una unidad de área, la expresión matemática se indica así:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde :

F= Fuerza total ejercida sobre la superficie.

A= Area total de la superficie.

Las unidades de presión del S. I. es el bar o bario y tiene los siguientes equivalentes:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \frac{N}{m^2} = 0.9869 \text{ atmósferas} = 100 \text{ Kilopascals (kpa)}$$

$$1 \text{ torricelli} = 760 \text{ mm Hg a } 0^\circ\text{C} = 1013.24 \text{ mbar} = 14.69 \text{ psi}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.1- METODO DE REFLEXION SISMICA

La imagen gráfica en el método de reflexión sísmica continua es la que aporta un cuadro más detallado de la estructura geológica del subsuelo, ésta proporciona información con lo cual es posible determinar las profundidades de la cima y base de las diferentes formaciones, con una exactitud que solo es superada por la medida tomada del pozo mismo.

## 1.2- GEOMETRIA DE LAS TRAYECTORIAS DE LA REFLEXION

Cuando una onda elástica es producida por una fuente de energía sísmica, cada superficie de separación del subsuelo que represente un cambio de las propiedades elásticas reflejará hacia la superficie. parte de la energía y un sismodetector situado en ésta, recibirá la llegada de la onda reflejada, registrando el tiempo empleado en el recorrido completo de la energía desde el punto de la emisión al detector. Existen dos casos que pueden ser estudiados: el primero es cuando la velocidad permanece constante en toda la capa y el segundo, que es el caso más general, en donde la velocidad es una función continua de la profundidad.

a) Velocidad constante.- En este caso los rayos sísmicos son líneas rectas. Sea P un punto de explosión. G un geofono receptor cualquiera y r una capa reflectora horizontal, como se observa en la figura 1.1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

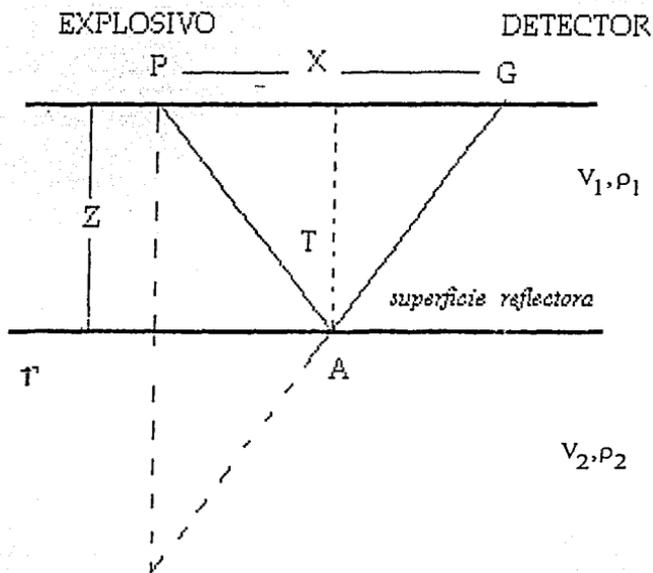


FIGURA 1.1 Representación gráfica de la trayectoria de una onda sísmica reflejada en el punto A

r: capa reflectora

Z: espesor de la capa superior ó profundidad de la superficie reflectora

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Si distancia = velocidad • tiempo

$$PAG = V \cdot T \quad y$$

$$PA = GA = \frac{1}{2} V \cdot T$$

Aplicando el Teorema de Pitagoras

$$\left(\frac{1}{2}VT\right)^2 = Z^2 + \left(\frac{1}{2}X\right)^2$$

Que desarrollando y simplificando queda

$$\frac{1}{4}V^2T^2 = Z^2 + \frac{1}{4}X^2$$

$$T^2 = \frac{4Z^2 + X^2}{V^2}$$

$$T = \frac{\sqrt{4Z^2 + X^2}}{V} \dots\dots\dots(1.1)$$

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{V^2T^2 - X^2} \dots\dots\dots(1.2)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La ecuación (1.1) nos permite determinar la mitad del tiempo total de recorrido de la onda sísmica reflejada en A. La profundidad a la que se encuentra el horizonte reflectante se determina por la ecuación (1.2) en función del tiempo, distancia horizontal y velocidad media.

- b) *Velocidad Variable.* El caso de la velocidad variable esta basado en los principios físicos del proceso de reflexión y se limita a considerar el caso sencillo de una superficie de contacto con dos estratos, uno de ellos de espesor estimado y el del otro, ilimitado, y de diferentes velocidad y densidad. Este diagrama de la figura 1.1 es ideal para ilustrar la óptica básica de las reflexiones, es un modelo que difiere de las ondas sísmicas tal como en realidad tiene lugar en el subsuelo.

Las formaciones sedimentarias están estratificadas de tal manera que la litología puede variar de manera considerable en el espacio de unos cuantos metros.

Dependiendo de la litología varían las propiedades elásticas y como se origina una reflexión en cada superficie de separación, es evidente que el proceso de la reflexión es en realidad un fenómeno interesante.

Para conocer la propagación de la onda sísmica en el subsuelo, suponemos el medio dividido en un cierto número de capas sedimentarias horizontales, en cada una de ellas con una velocidad sísmica constante y que se incrementa en las capas más profundas, como se muestra en la figura 1.2

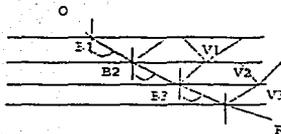


FIGURA 1.2 Onda sísmica refractada en varias superficies de separación

Supongamos en la figura 1.2 que el rayo OR con origen en O, formando un ángulo inicial con

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

la vertical. Aplicando la 2ª Ley de la refracción o la 2a Ley de Snell, dice que cuando una onda incidente choca con una superficie de separación que divide dos medios, el seno del ángulo de incidencia  $\beta_1$  es al seno del ángulo refractado  $\beta_2$ , como la velocidad de la onda incidente  $V_1$  es la velocidad de la onda refractada  $V_2$ :

$$\frac{\text{Sen}\beta_2}{\text{Sen}\beta_1} = \frac{V_2}{V_1}, \frac{\text{Sen}\beta_3}{\text{Sen}\beta_2} = \frac{V_3}{V_2}, \dots, \frac{\text{Sen}\beta_n}{\text{Sen}\beta_{n-1}} = \frac{V_n}{V_{n-1}}$$

Multiplicando estas relaciones sucesivamente encontramos que el ángulo vertical para un medio  $n$  esta dado por la relación:

$$\text{Sen}\beta = \frac{V}{V_1} \text{Sen}\beta_{n-1} \dots \dots \dots (1.3)$$

Si se hace que el número de medios sea infinito, y cada medio tenga un espesor infinitamente pequeño, estaremos en el caso de una distribución continua de la velocidad con la profundidad y entonces el ángulo  $\beta$ , a una profundidad cualquiera estará dado por:

$$\text{Sen}\beta = \frac{V}{V_1} \text{Sen}\beta_1 \dots \dots \dots (1.4)$$

Siendo  $V = F(Z)$ ; la velocidad superficial y  $\beta$  el ángulo del rayo con la vertical, como lo muestra la figura 1.3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

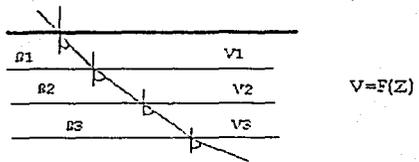


FIGURA 1.3 Distribución de variación continua de  $\beta$  y de la velocidad con la profundidad

Si a  $\frac{\text{Sen}\beta_1}{V_1}$  lo hacemos igual a la constante P, la ecuación se transformará en:

$$\text{Sen}\beta = PV \dots \dots \dots (1.5)$$

Y como el rayo recorre una distancia  $\delta s$  en el tiempo  $\delta t$ , tenemos que:

$$\delta s = V\delta t \dots \dots \dots (1.6)$$

H

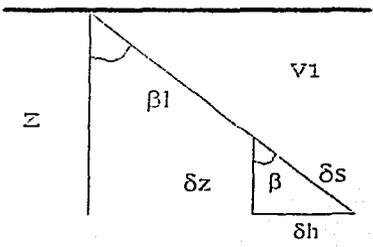
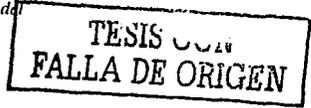


FIGURA 1.4 Componentes horizontal y vertical del rayo sísmico



De la figura 1.4 vemos que la función trigonométrica de la tangente estará dada por:

$$\text{Tan}\beta = \frac{\delta h}{\delta z} = \frac{\text{Sen}\beta}{\text{Cos}\beta} \dots\dots\dots(1.7)$$

pero si consideramos:

$$\text{Cos}\beta = \sqrt{1 - \text{Sen}^2\beta} \dots\dots\dots(1.8)$$

Sustituyendo (1.5) y (1.8) en (1.7) tenemos :

$$\frac{\delta h}{\delta z} = \frac{\text{PV}}{\sqrt{1 - (\text{PV})^2}} \dots\dots\dots(1.9)$$

Integrando la ecuación (1.9) obtendremos la distancia horizontal en H

$$H = \int_0^z \frac{\text{PV} \delta z}{\sqrt{1 - (\text{PV})^2}} \dots\dots\dots(1.10)$$

De la figura 1.3 tenemos que el Cos  $\beta$  será:

De donde

$$\text{Cos } \beta = \frac{\delta z}{\delta s}$$

$$\delta s = \frac{\delta z}{\text{Cos } \beta} \dots\dots\dots(1.11)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

sustituyendo (1.6) en (1.11)

$$V \cdot \delta t = \frac{\delta z}{\cos \beta}$$

de donde

$$\frac{\delta t}{\delta z} = \frac{1}{V \cos \beta} \dots\dots(1.12)$$

Sustituyendo (1.5) y (1.8) en (1.11) tendremos :

$$\frac{\delta t}{\delta z} = \frac{1}{V \sqrt{1 - (PV)^2}} \dots\dots (1.13)$$

Integrando la ecuación (1) se tendrá el tiempo T:

$$T = 2 \int_0^Z \frac{\delta z}{V \sqrt{1 - PV^2}} \dots\dots(1.14)$$

Se ha multiplicado por dos ya que el tiempo registrado en el origen es 2 veces el tiempo del origen al reflector. (tiempo de ida y vuelta).

Cuando la velocidad es una función conocida de z, las ecuaciones (1.10) y (1.14) no son suficientes para determinar H y Z en función de los valores medidos de T y P; y estaremos en condiciones de conocer la profundidad de los medios reflectantes.

Para poder utilizar las ecuaciones básicas (1.10) y (1.14) es necesario conocer la Velocidad de Propagación de la onda sísmica en el área a investigar.

Las experiencias en medidas de velocidad efectuadas en pozos profundos, indican que se pueden hacer dos generalizaciones para la determinación de las capas reflectantes:

- 1) La velocidad aumenta generalmente con la profundidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- 2) Si bien la velocidad varía lateralmente de un punto a otro dentro de la misma zona, esta variación suele ser pequeña y no se considera.

Finalmente, para utilizar las formulas básicas necesitamos que la función velocidad-profundidad sea continua para que esta sea integrable. Por ello se adoptan formulas de la velocidad en función de la profundidad del tipo:

$$V = (V_0 + az) \frac{1}{P} \dots\dots\dots (1.15)$$

Donde  $V_0$  = velocidad inicial       $P$  = profundidad  
 $a$  = constante empírica       $z$  = profundidad capa reflectora

Generalmente antes de iniciar una prospección se hacen medidas de velocidad y basándose en las mismas se elige la ley de velocidad que más se aproxime a las mediciones efectuadas.

La ley de velocidad más sencilla es la que supone que la velocidad es una función lineal de la profundidad, es decir la que resulta de hacer  $P=1$  en la expresión (1.15) quedando del tipo:

$$V = V_0 + az \dots\dots\dots (1.16)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.3- FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS SISMICAS

Existe una gran variedad de factores en las rocas que afectan directamente a la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, estos factores identificados por las características o propiedades de la roca, a su vez tienen cada una, un amplio rango de variación, que dependerá precisamente del estado intrínseco de la misma, entre los más importantes podemos citar:

LITOLOGÍA

EDAD GEOLOGICA

PROFUNDIDAD

POROSIDAD

PRESION DE FORMACION O SOBRECARGA

DENSIDAD

La figura 1.5 nos muestra una escala de velocidad para diferentes tipos de materiales del subsuelo.

Se ha logrado determinar el efecto que producen las características mencionadas en el comportamiento de la velocidad. La figura 1.6 muestra en forma esquemática este comportamiento de la velocidad ante otros factores. Cada efecto se manifiesta así, la porosidad, la saturación de agua, y la presión de formación, varían inversamente proporcional a la velocidad como se representa en las ilustraciones a, c y e, caso contrario con la densidad y la presión de sobrecarga que varían directamente proporcional con la velocidad como se representa en las ilustraciones b y d.

Gardner, L. W. (1974) determinó que al graficar la velocidad contra la densidad en escala logarítmica, la velocidad se comporta en forma lineal para casi todos los tipos de roca.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## MATERIAL

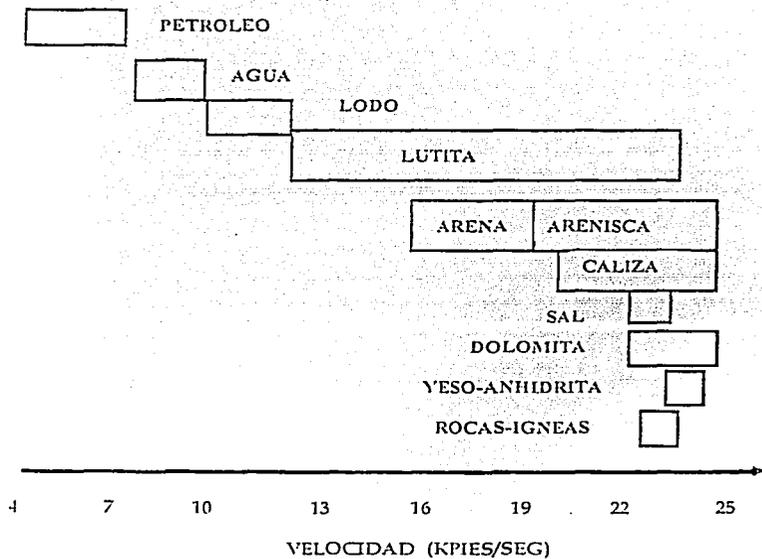


FIGURA 1.5 La gráfica muestra la variación normal de la velocidad de propagación en diferentes tipos de materiales (Faust L.Y.,1965)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

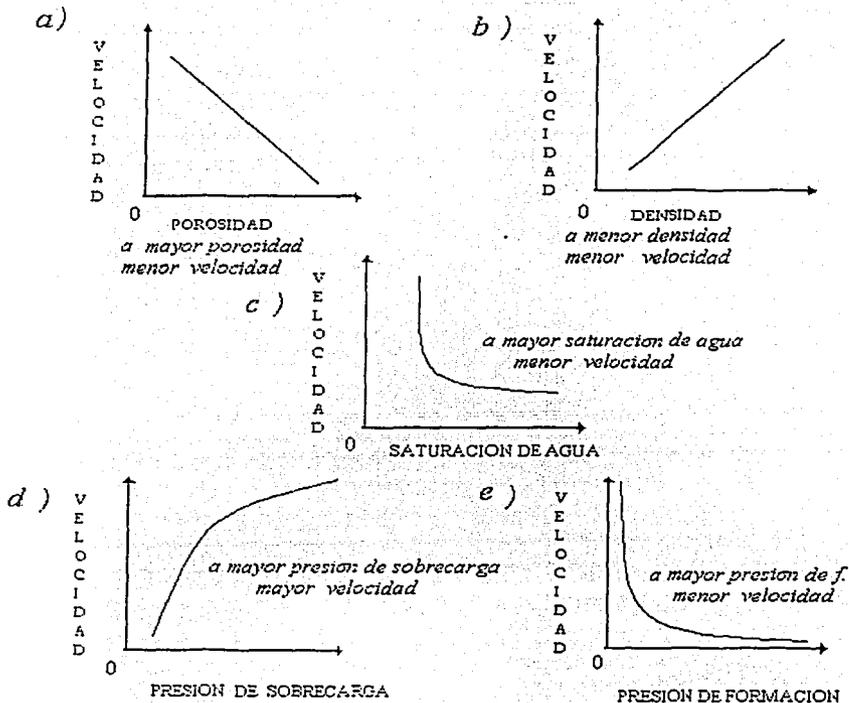


FIGURA 1.6 Las ilustraciones a, b, c, d y e explican la variación directa o inversamente proporcional de la velocidad con cada uno de los factores según el caso

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Encontró una ecuación empírica para calcular la DENSIDAD en función de la VELOCIDAD que es válida para casi todas las rocas:

$$\delta = 0.23 V^{0.25} \dots (1.17)$$

Donde  $\delta$  esta en  $\text{gm/cm}^3$  y  $V$  esta en pies/seg

La figura 1.7 de acuerdo con Gardner (1974) muestra precisamente la relación que existe entre la velocidad y la densidad. Se adicionaron valores de impedancia acústica, responsable del grado de reflectividad de las rocas y se observó que estas forman con la divisoria del tipo de roca un ángulo recto con el comportamiento de la mayor parte de ellas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

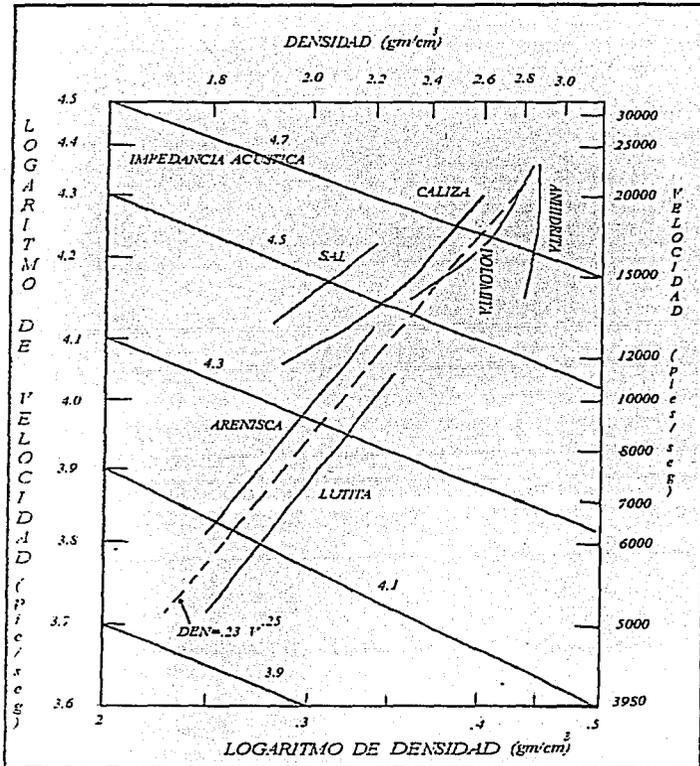


FIGURA 1.7 Determinación de la densidad en función de la velocidad y la impedancia acústica (Gardner L.W. 1974)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el año de 1950 Faust, L. Y., realizó un estudio de velocidades sísmicas en rocas sedimentarias. Los datos fueron obtenidos de más de 500 registros de velocidad tomados de pozos petroleros de la Corporación Petrolera Amerada, en Estados Unidos y Canadá, recopilados en un período mayor a 15 años.

Faust considera a la velocidad como una función de la PROFUNDIDAD, LA EDAD GEOLOGICA Y LA LITOLOGIA, sin embargo encontró que la litología varía considerablemente en las areniscas y las rocas carbonatadas. Al mantener constante la litología determinó que no se afecta a la velocidad de intervalo, si se trata de arenas y lutitas.

Las conclusiones que este autor encontró más importantes, fueron las siguientes:

1. La velocidad de intervalo se incrementa gradualmente con la profundidad y la edad geológica.
2. La variación de las velocidades no fue considerable en relación a las provincias geológicas, a excepción del Cretácico y el Eoceno del suroeste de Texas y el Devónico en la cuenca de los Apalaches.
3. Determinó que el incremento de la velocidad con respecto a la profundidad y a la edad geológica se comporta en forma exponencial, dando una ecuación del tipo:

$$V = K (Z)^{\frac{1}{N}} \dots (1.18)$$

En donde:

Z = profundidad

K y N = constantes de la edad geológica

4. Concluye su trabajo finalmente con la ecuación empírica:

$$V = 125.3 (ZE)^{\frac{1}{6}} \quad (1.19)$$

En donde:

E= edad geológica en millones de años

Z= profundidad en pies

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La ecuación (1.19) tiene la particularidad de que al graficar en escala logarítmica la profundidad y la velocidad se forma una línea recta de pendiente igual a seis para cada edad geológica, como se ilustra en la figura 1.8.

1.4- Ley de velocidad de la onda sísmica. Esta ley es indispensable para determinar la profundidad de los cuerpos reflectantes, existen tres procedimientos para hacerlo, estos son:

Primero. Es indirecto y consiste en llegar a la velocidad media partiendo de las medidas de los tiempos registrados en los sismogramas obtenidos por el método de reflexión, este será el método de interés para el objetivo de la tesis.

Segundo. Es directo y consiste en medir la velocidad utilizando pozos profundos, partiendo del tiempo de arribo de la onda sísmica desde la superficie al geofono situado en el pozo o bien:

Tercero. Es a partir de los tiempos de llegada de la onda sonora producida por un equipo transmisor a unos receptores incorporados a él y situados a distancias fijas, constituyendo un aparejo emisor-receptor que se va desplazando de una manera continua a través del pozo con el correspondiente registro continuo de velocidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

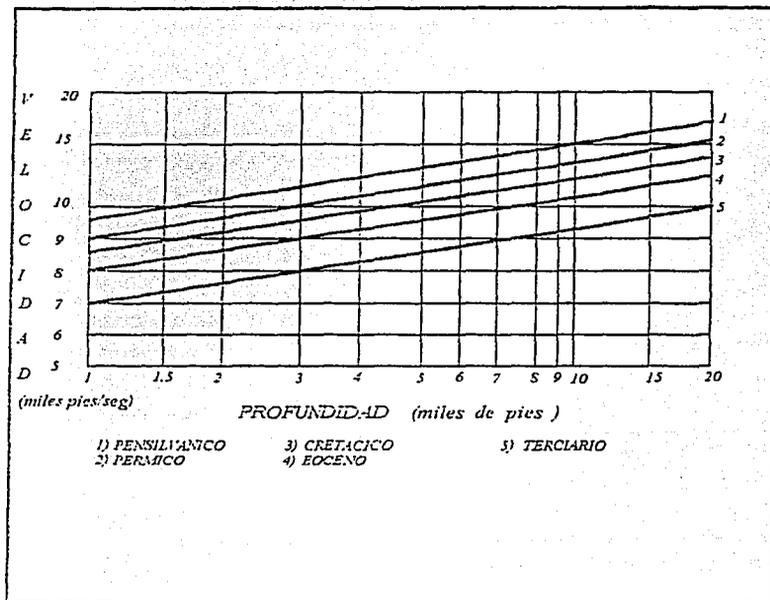


FIGURA 1.8 Gráfica logarítmica de la velocidad Vs la profundidad  
 La gráfica representa la relación entre la velocidad  
 y la profundidad para cada período geológico referido a  
 las rocas (Faust L.Y., 1955)

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

1.5- Determinación de la velocidad de propagación por método de reflexión sísmica.

Cuando no conocemos información de velocidades obtenidas en pozos, es posible determinar una función aproximada de la velocidad a partir de velocidades sísmicas observadas en la superficie.

Existen dos métodos para efectuar este cálculo que son:

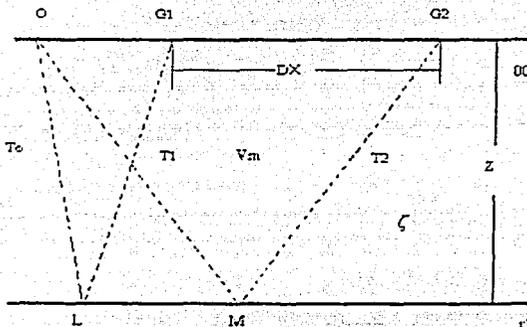
i) Método de los perfiles de reflexión y ii) Método  $t - dt$ .

i) Método de los perfiles de reflexión. En la figura 1.9 supongamos que disparamos y registramos en un plano horizontal  $00$ . Siendo  $r1$  una capa reflectora horizontal.

En donde:

$O$  Punto de explosión

$G1$  y  $G2$  Geofonos



$Z$  = profundidad del horizonte reflector

$V_m$  = Velocidad media entre la superficie y el reflector

$T_0$ ,  $T_1$  y  $T_2$  = Tiempo de un viaje redondo a cada geófono

FIGURA 1.9 Reflexión de los rayos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Si suponemos las trayectorias de las rectas podremos escribir:

$$OM = \frac{V_m \cdot T_2}{2} \quad OL = \frac{V_m \cdot T_1}{2}$$

De donde:

$$T_1 = T_{OLG1} \quad T_2 = T_{OMG2}$$

$$X_1 = OG1 \quad X_2 = OG2$$

Por el Teorema de Pitagoras tendremos:

$$Z^2 = \frac{1}{4} (V_m T_1)^2 + \frac{1}{4} (X_1)^2 \dots\dots\dots (1.20)$$

$$\left(\frac{1}{2} V_m T_2\right)^2 = \left(\frac{1}{2} X_2\right)^2 + Z^2$$

$$Z^2 = \frac{1}{4} (V_m T_2)^2 + \frac{1}{4} (X_2)^2 \dots\dots\dots (1.21)$$

Iguando las ecuaciones (1.20) y (1.21) tendremos:

$$\frac{1}{4} (V_m T_2)^2 + \frac{1}{4} (X_2)^2 = \frac{1}{4} (V_m T_1)^2 + \frac{1}{4} (X_1)^2$$

$$V_m^2 (T_2 - T_1)^2 = X_2^2 - X_1^2$$

Despejando  $V_m^2$  tendremos:

$$V_m^2 = \frac{X_2^2 - X_1^2}{T_2^2 - T_1^2} = \text{constante.} \dots\dots\dots (1.22)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De la expresión (1.22) se deduce que la relación entre  $X^2$  y  $T^2$  es lineal para cada reflector horizontal, de tal manera que si estos dos valores los representamos en una gráfica formarían una línea recta. Realmente sobre la gráfica, como las observaciones de  $X$  y  $T$  están afectadas por determinados errores conviene elegir varios puntos para determinar la recta que mejor se ajuste a ellos figura 1.10.

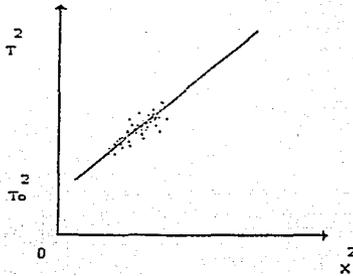


FIGURA 1.10 Determinación de velocidad por perfiles de reflexión; los puntos son los pares de  $T^2, X^2$  y la recta se obtiene al realizar un ajuste por mínimos cuadrados

Si la pendiente  $m$  es el coeficiente angular de la recta determinada, la velocidad media será:

$$V_m = \sqrt{\frac{1}{m}} \dots \dots \dots (1.23)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Hay que observar que la recta corta al eje  $T^2$  en el punto  $T_0^2$ , tiempo que corresponde a la trayectoria vertical ó tiempo mínimo ( $x=0$ ).

Por lo tanto la profundidad de la capa reflectora será:

$$z = \frac{V_m T_0}{2} \dots\dots\dots (1.24)$$

Repetiendo el procedimiento para cada uno de los reflectores horizontales se pueden determinar las distintas velocidades medias y la profundidad de cada horizonte. Cuando las capas no son horizontales se dispone de perfiles inversos, así como también del promedio de las velocidades medias obtenidas en ambos sentidos.

ii) Método  $t-\delta t$ . En la figura 1.9,  $G_1$  y  $G_2$  representan dos geófonos; "O" el punto de tiro y  $m$  el punto medio entre los geófonos.

Si hacemos  $O_m = X$   $G_1$  y  $G_2 = \delta x$  e igualando:

$$X_2 + X_1 = 2X$$

$$X_2 - X_1 = \delta X$$

$$T_2 + T_1 = 2T$$

$$T_2 - T_1 = \delta T$$

Por lo tanto:

$$(X_2 + X_1)(X_2 - X_1) = (X_2^2 - X_1^2)$$

La ecuación (1.22) se transforma a:

$$V_m^2 z = \frac{x \delta x}{t \delta t} \dots\dots\dots (1.25)$$

O bien

$$T \delta T = \frac{x \delta x}{V_m^2} \dots\dots\dots (1.26)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Debido a que  $x$ ,  $\delta x$  y  $V_m$  son constantes para cada reflector horizontal .

Si representamos en unos ejes coordinados  $\delta T$  y  $T$  para las mejores reflexiones de un gran número de sismogramas y trazamos la curva  $R$  que más se aproxime a ellos, como se muestra en la figura 1.11. Obtendremos la variación de las velocidades medias ya que para cada valor de  $T$  y  $\delta T$  de cada punto de la curva obtendremos  $V_m$  de cada una de las ecuaciones anteriores, puesto que  $X$  y  $\delta X$  son valores conocidos.

Una vez determinada  $V_m$  para un tiempo  $T$ , la profundidad  $Z$  se obtiene por la ecuación:

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{V_m^2 T^2 - X^2} \dots\dots\dots (1.27)$$

Como anteriormente se había mencionado si los estratos no son completamente horizontales se deberá tirar en ambos sentidos y obtener el valor promedio de  $T$  y  $\delta T$ .

Entre mayor sea la longitud de  $X$  será más precisa la medida para ambos procedimientos figura 1.9.

Debido a que la cantidad de datos tomados es enorme, uno debe apoyarse en una herramienta que en la actualidad es muy valiosa, la computadora, lo que ha permitido obtener gráficas de apilamiento (Con la ley de velocidad que representa la máxima coherencia dentro de una familia de trazas sísmicas) contra el tiempo de reflexión, o bien gráficas equivalentes a la velocidad cuadrática media VRMS que es la velocidad corregida por diversos factores y medida desde un punto medio de común - contra el tiempo de reflexión, a esta última técnica gráfica se le conoce como VELAN, figura 1.12 y el proceso que se aplica se llama Análisis Automático de la Velocidad .

De los datos del Análisis Automático de Velocidad se obtienen los perfiles de la velocidad de intervalo y consecuentemente perfiles de tiempo de tránsito contra la profundidad y esta información es la que finalmente es el punto de partida para la PREDICCIÓN DE PRESIÓN DE FORMACIÓN y de fractura, que son necesarios para la planeación de la perforación de los pozos exploratorios tan útil para así evitar la pérdida de recursos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

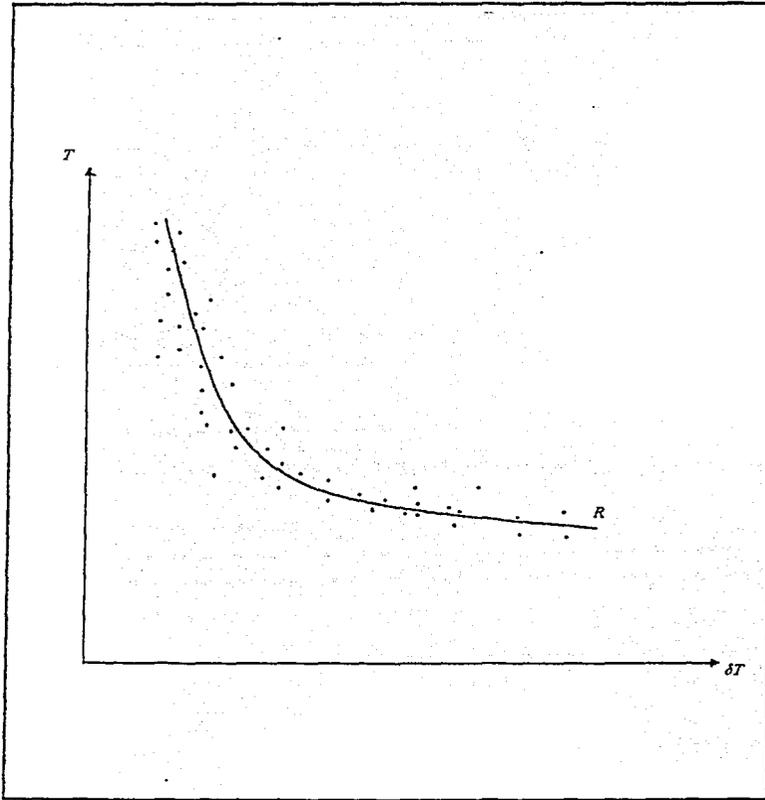


FIGURA 1.11 Representación de la gráfica de  $T$  y  $\delta T$   
 $R$  es la curva que representa las mejores reflexiones y la utilidad de ésta es para determinar la velocidad media de cada par de  $t$ ,  $\delta t$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

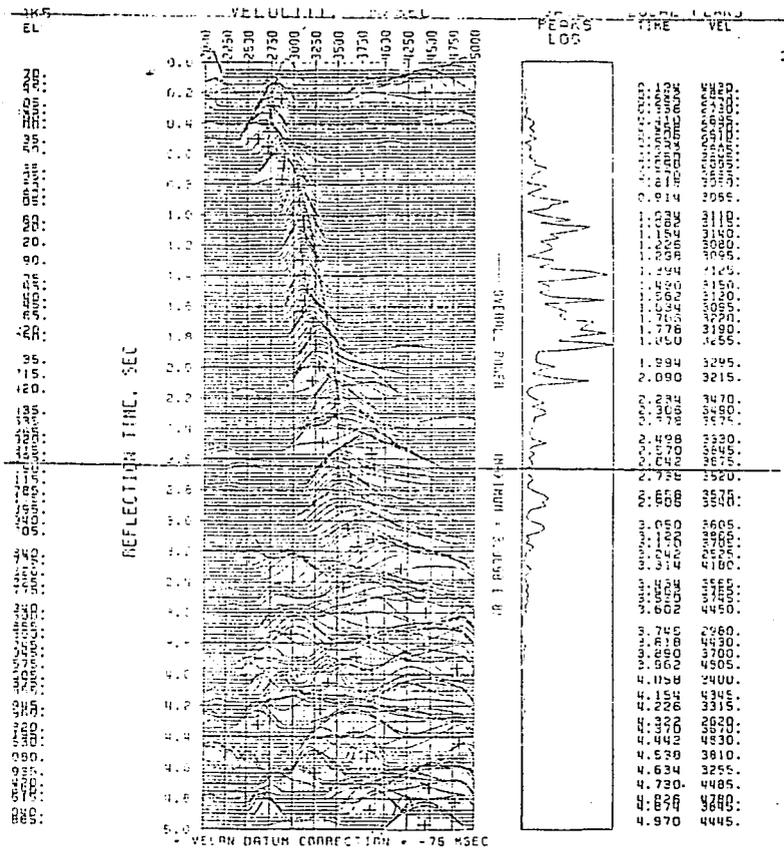


FIGURA 1.12 Gráfica de la izquierda representa la velocidad cuadrática media contra el tiempo también llamado VELAN. La gráfica intermedia representa la traza sísmica y la tabla de valores de la derecha son pares de tiempo y velocidad.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## 1.6- PROCEDIMIENTO PARA CONSTRUIR LAS GRÁFICAS DE VELOCIDAD DE INTERVALO Y DEL TIEMPO DE TRÁNSITO, CONTRA LA PROFUNDIDAD

La velocidad de intervalo se define como la velocidad promedio en el intervalo formado por dos superficies reflectantes y se obtiene aplicando la ecuación desarrollada por Dix (1955):

$$V_{INT\ i+1}^2 = \frac{V_{i+1}^2 \cdot T_{i+1} - V_i^2 \cdot T_i}{T_{i+1} - T_i}$$

donde:  $i$  es el cuerpo superior e  $i+1$  es el inferior.  $T_i$  = tiempo de capa superior y  $T_{i+1}$  = tiempo de capa inferior.  $V$  = velocidad cuadrática media.

Para obtener las gráficas antes mencionadas es necesario tener los valores de velocidad aparente y el tiempo de recorrido para cada reflector estimados de la gráfica  $X^2 - T^2$  del método de los perfiles de reflexión, o bien, a partir de las gráficas del Análisis Automático de Velocidad obtenidas por programa de computadora VELAN.

### Método para la elaboración de las gráficas

1. En el análisis de velocidad se unen los puntos de los cuerpos reflectantes de mayor contraste de impedancia acústica y se obtienen sus coordenadas de velocidad y tiempo, tal como se muestra en la figura 1.12.
2. Necesitamos construir una tabla de valores para facilitar la aplicación de la ecuación de Dix y el manejo de los datos de graficación (que ha implicado el desarrollo de programas por computadora).
3. Finalmente con los datos de la tabla se procede a graficar el tiempo, figura 1.13, la velocidad de intervalo, figura 1.14 y el tiempo de tránsito, figuras 1.15 y 1.16; contra la profundidad como en todas las gráficas.

En realidad las figuras 1.14, 1.15 y 1.16 nos representan una forma de registro sísmico sintético ya que el registro sísmico se puede transformar en un sismograma sintético pasando por gráficas que muestran los coeficientes de reflexión, tiempo de tránsito (que es el inverso de la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

velocidad de intervalo) y la velocidad de intervalo contra profundidad. Recíprocamente un sismograma puede transformarse en un registro sónico sintético pasando también por las mismas gráficas.

Como se verá en detalle en el capítulo IV, el tratamiento que se da a la gráfica de tiempo de tránsito contra la profundidad, es el punto de partida para la DETECCIÓN Y CUANTIFICACION DE LA PRESIÓN ANORMAL así como de la PRESIÓN DE FRACTURA de la roca.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

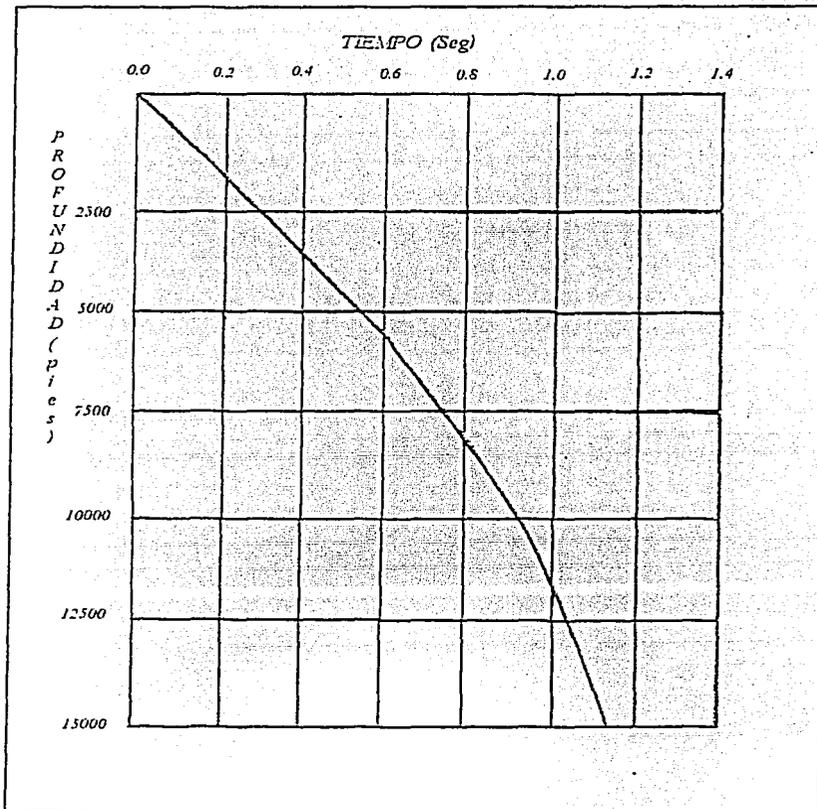
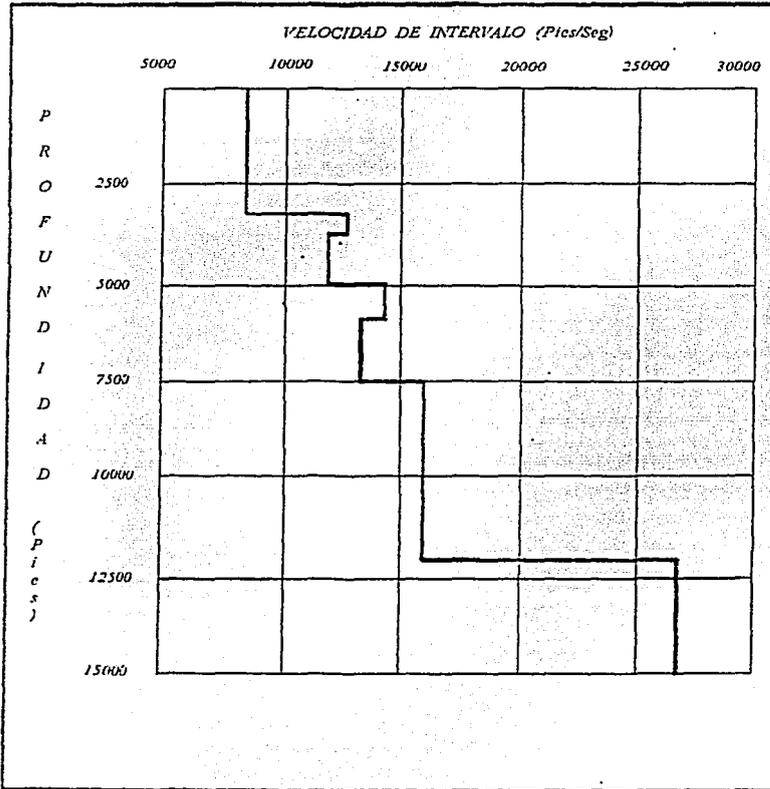


FIGURA 1.13 Tiempo - Profundidad

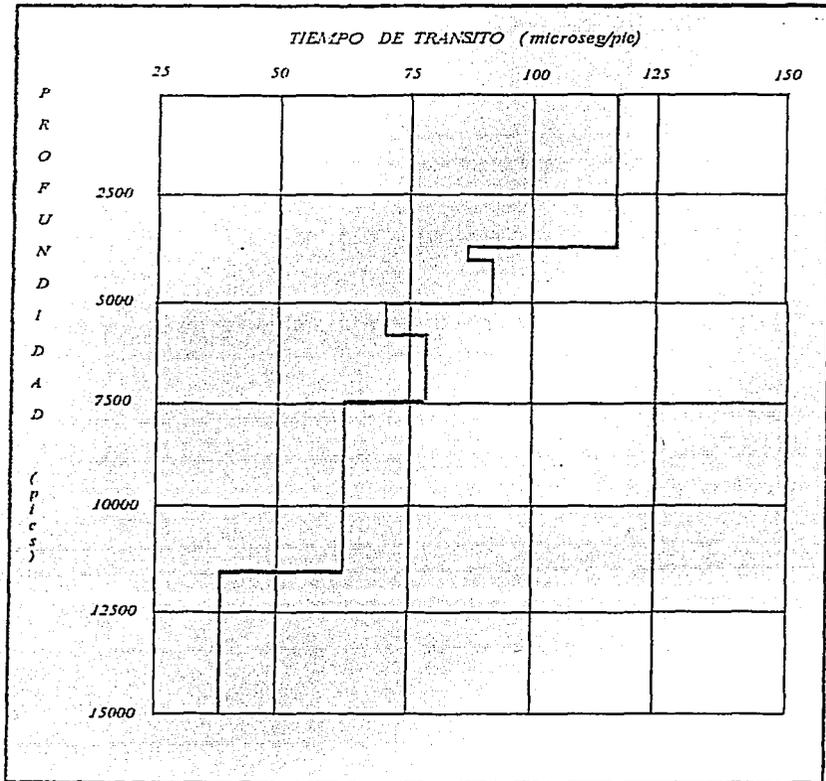
La gráfica representa el comportamiento del tiempo contra la profundidad; es el tiempo que le toma a la ondicúla llegar a determinada profundidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIGURA 1.14** *Velocidad de intervalo Vs la profundidad*  
 Es la gráfica que representa el comportamiento  
 de la velocidad de intervalo contra la profundidad  
 y nos dará información sobre la presión anormal

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**FIGURA 1.15** *Tiempo de tránsito y profundidad*  
 Gráfica que representa la variación del tiempo de tránsito  
 contra la profundidad considerando el tiempo de tránsito  
 como el inverso de la velocidad de intervalo

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

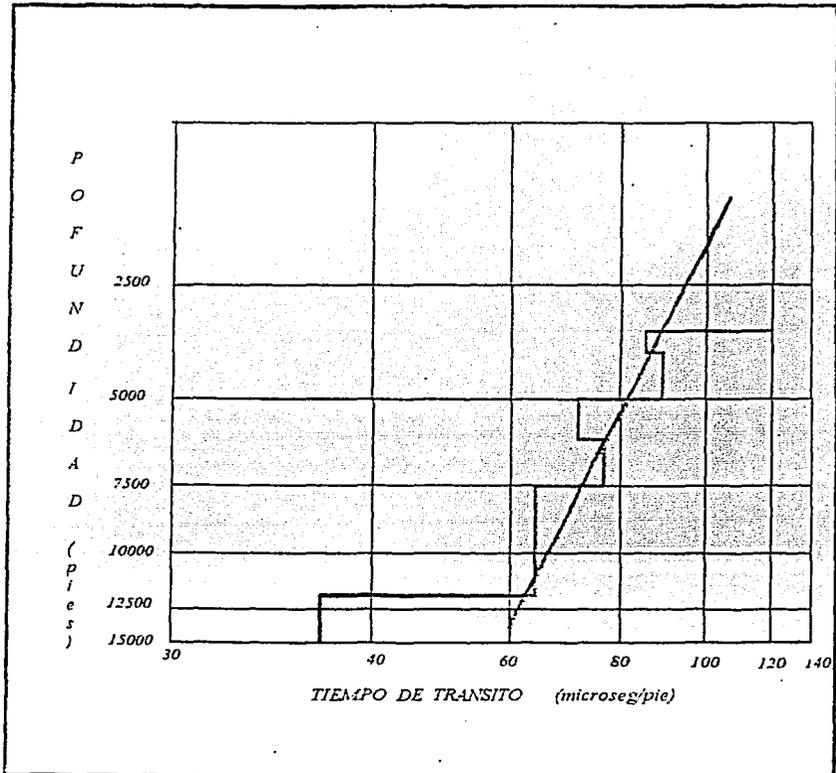


FIGURA 1.16 Gráfica logarítmica del tiempo de tránsito Vs la profundidad  
Gráfica que representa la variación del tiempo de tránsito (inverso de velocidad de intervalo) contra la profundidad en escala logarítmica

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.7- DETERMINACION AUTOMATICA DE LA VELOCIDAD

La técnica de la determinación automática de la velocidad, por computadora fue desarrollada por (Taner, M. T. and Köehler, G., 1967). Debemos de tener en cuenta que la confiabilidad de los resultados estará en función de la calidad de los datos sísmicos al igual que de la presencia de los cuerpos reflectores con suficiente contraste de impedancia acústica.

El análisis automático de velocidad se utilizará para determinar la velocidad de apilamiento, que nos sirve para realizar las correcciones dinámicas, procesar las secciones sísmológicas y conocer la velocidad de intervalo, que es, como se dijo, el punto de partida para la detección de las presiones anormales y de fracturamiento.

Del esquema de arreglo sísmico para el CMP (punto medio común) como se muestra en la figura 1.17 se puede deducir que:

$$\delta T = T - T_0 \quad (1.28)$$

Del Teorema de Pitágoras y sustituyendo en unidades de tiempo las distancias de X y D, tendremos:

$$T^2 = (2D/V)^2 + (X/V)^2 \dots \dots \dots (1.29)$$

Considerando que:

$$T_0 = (2D/V) \dots \dots \dots (1.30)$$

Sustituyendo (1.30) en (1.29):

$$T = \sqrt{(T_0)^2 + (X/V)^2} \dots \dots \dots (1.31)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

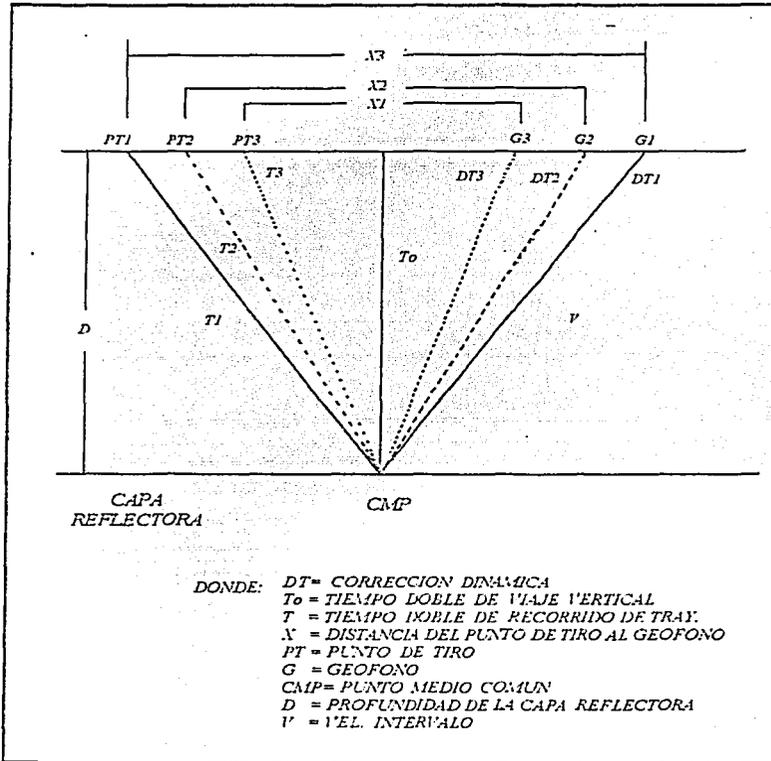


FIGURA 1.17 Elementos que participan en el arreglo sísmico de reflexión con el método del punto medio común

Sustrayendo  $T_0$  en ambos miembros de la ecuación (1.31) y sustituyendo en la ecuación (1.28) tendremos finalmente:

$$\delta T = \sqrt{(T_0)^2 + (X/V)^2} - T_0 \dots\dots\dots (1.32)$$

A la ecuación (1.32) se la conoce como corrección dinámica la cual esta en función de la velocidad promedio, la velocidad del punto de tiro al geófono y el tiempo de reflexión. Los datos que obtenemos de un registro sísmico son el tiempo de reflexión, la distancia es conocida, por lo tanto lo único que faltaría por conocer es la velocidad.

En la figura 1.18 se tienen tres trayectorias lo que constituye una familia de punto medio común (CMP) al 300%, las cuales una vez corregidas, integran una traza sísmica.

El Análisis Automático de Velocidad, VELAN, consiste en probar iterativamente un cierto número de velocidades en la ecuación (1.32) hasta encontrar la que mejor se ajuste a la familia de trayectorias por reducción de ellas a la vertical.

Para realizar el análisis de la velocidad se considera la siguiente metodología (fijando parámetros de entrada):

- Velocidad máxima y mínima en el rango de barrido.
- Incremento de velocidad para cada iteración dentro del rango de barrido. Generalmente se fija entre 25 y 100 m/seg.
- Número de iteraciones. Estará en función del rango de barrido y el incremento de velocidad fijados.
- Longitud de la ventana. Generalmente se fija de 12 a 60 m/seg y representa el incremento en tiempo entre zonas consecutivas de cálculo.

Cada zona horizontal de cálculo (ventana) representa el efecto suma de la operación de correlación cruzada (cross-correlation) entre las trayectorias que forman la familia, siendo la agrupación de todas las ventanas de cálculo lo que constituye el análisis de velocidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

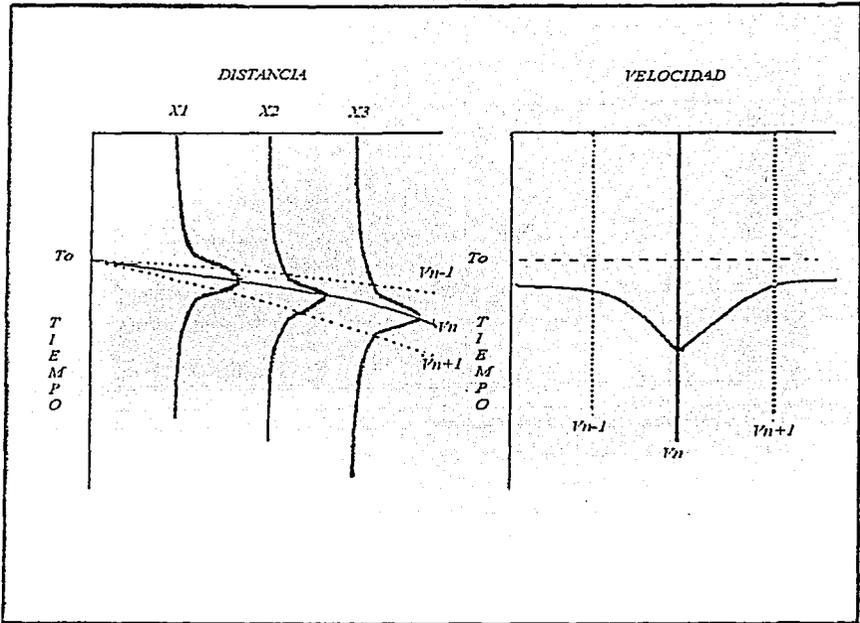


FIGURA 1.18 Representación gráfica de trayectorias obtenidas por el método de punto medio común.

Por medio de la corrección dinámica de los eventos sísmicos de la gráfica del lado izquierdo (tiempo hiperbólico) obtenemos la gráfica del lado derecho (mayor coherencia de velocidad)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.8- TIPOS DE PRESION

Presión Atmosférica (Pat).- Es el peso por unidad de área de la columna de aire igual a la de la atmósfera. La expresión para calcularla es:

$$P_{at}(y) = P_{oc} e^{-ay}$$

donde:

$P_{oc}$  = presión a nivel del mar

$y$  = altura del lugar m.s.n.m.

$a = .116 \text{ Km}^{-1}$

Presión Hidrostática (PH).- Es la fuerza por unidad de área que ejercen los fluidos. En nuestro caso la fuerza actúa sobre la superficie de un sólido que esta en contacto con estos fluidos. La presión existe en cada punto en el que reposa el fluido. La magnitud de la presión es proporcional a la profundidad debajo de la superficie, recordemos que la gravedad siempre está presente.

La presión hidrostática es igual al producto de la densidad promedio del fluido por la profundidad, es decir, la altura de la columna y se expresa:

$$PH = \delta \cdot h$$

Donde:

$\delta$  = densidad promedio

$h$  = profundidad

La presión hidrostática es afectada por la concentración de sólidos, gases disueltos y temperatura. un incremento en la salinidad del fluido aumentará también la presión: una mayor cantidad de gas en solución y a alta temperatura reducirá la presión hidrostática. El gradiente de presión normal se considera como  $0.1704 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$  (ó  $0.465 \text{ psi/ft}$ ), el gradiente normal de presión de formación se considera, que es el ejercido por una columna de agua de una salinidad de 80000 p.p.m. de NaCl a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , por cada m de profundidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Presión de Sobrecarga (S).- Esta presión es la originada por el peso de las rocas sobreyacentes al punto de interés a partir de la densidad combinada de la matriz rocosa y de los fluidos en los espacios porosos; es decir, es la suma de la densidad combinada del peso de la matriz rocosa más el peso del fluido intersticial.

Matemáticamente podemos expresar la presión de sobrecarga como:

$$S = D \{ (1 - \phi) \delta r + \phi \delta f \}$$

donde:

$\phi$  = porosidad

$\delta r$  = densidad de la roca

$\delta f$  = densidad del fluido

D = profundidad

S = peso de la matriz de roca + peso del fluido intersticial

El gradiente promedio de presión de sobrecarga que se ha considerado es de 0.231 kg/cm<sup>2</sup>/m (ó 1.0 psi/ft), que corresponde a la fuerza ejercida por el sistema roca fluido de una densidad promedio de 2.31 gr/cc. Esto es, en las formaciones del Terciario de la zona Continental del Golfo de México. Aunque se ha observado que el gradiente de sobrecarga varía de un lugar a otro y también está en función de la profundidad, por lo que se recomienda siempre que sea posible se determine a partir de ésta.

Presión de formación (P).- La presión de formación P, también es conocida como presión de poro, que es definida como aquella a la que se encuentran confinados los fluidos dentro de los espacios huecos de las rocas.

Recordemos que el gradiente de presión normal de formación es la variación de la presión hidrostática con la profundidad el que ejerce una columna de agua de 80000 p.p.m. de NaCl a una temperatura de 25°C por cada metro. A partir de este concepto, nosotros definiremos como gradiente de presión anormal, como aquel que se aparte de este valor de la presión de poro, pudiendo estar por encima o por debajo de ella así tendremos presiones anormalmente altas o bajas, siendo las primeras las que estudiaremos en este trabajo.

En la figura 1.19 se presenta gráficamente la zona de presión anormal acotada entre los gradientes de las presiones descritas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

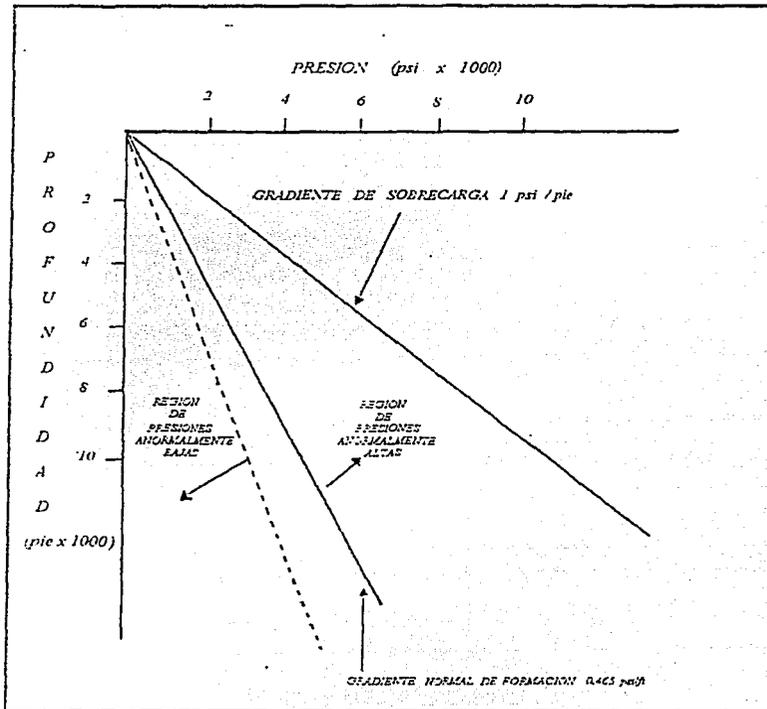


FIGURA 1.19 Gradientes de presión de formación y de sobrecarga

Presión de Fractura (F).- La presión de fractura  $F$  es la fuerza por unidad de área necesaria para vencer la presión de formación y la resistencia de la roca.

El grado de resistencia que ofrece una formación rocosa a su fracturamiento, depende de la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de compresión a los que esta sometida. Generalmente la roca se rompe a presiones inferiores a la presión de sobrecarga.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO II.- ORIGEN DE LAS PRESIONES ANORMALES EN LAS FORMACIONES

Debido a que la medida de la presión es una información indispensable en ingeniería, en este capítulo se da un compendio sobre el origen de las presiones anormales en las formaciones de las rocas.

La presión original esta íntimamente ligada con la historia del contenido de agua en la roca. Cuando se observa regionalmente, la cantidad de aceite y gas en las rocas es muy pequeña comparada con la cantidad de agua presente. El agua no solo actúa como medio a través del cual el aceite y gas puedan acumularse en los pozos y yacimientos, sino también como un agente principal de transmisión de presiones en los fluidos de un área a otra.

En las lutitas y rocas de grano fino de extremadamente baja permeabilidad, el agua se presenta como una película de moléculas de poco espesor. En rocas más permeables ( en los así llamados acuíferos), las aguas ocupan del 10 al 40% del volumen de la roca. Así los pozos de petróleo y gas se encuentran frecuentemente relacionados con la reserva de agua, por lo tanto, algunos de los fenómenos de presión ocurren en la geología de la roca almacenadora de agua y así también, ocurren en las rocas con aceite y gas.

Una causa que produce el incremento de la presión en la roca almacenadora es una roca sello o la confinada por los cuerpos de baja transmisibilidad de los fluidos. Las fuentes más importantes de presión en los fluidos en rocas almacenadoras son:

- 1) La presión debida a una columna de agua.
- 2) Fenómeno de compactación.
- 3) El fenómeno de Osmosis.
- 4) Cambios de temperatura.
- 5) Precipitación secundaria o fenómeno de cementación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Todos estos factores contribuyen para modificar la presión original de la formación, algunos son más importantes que otros y es casi imposible determinar la contribución individual de cada uno.

## II.1- PRESIÓN DEBIDA A UNA COLUMNA DE AGUA

Los poros interconectados próximos a la roca almacenadora se encuentran llenos de agua, los cuales transmiten una presión, esta es la mejor fuente de presión permanente en el sistema. Cuando el agua esta en reposo, ejerce una presión hidrostática, la cual actúa en ángulos rectos a la superficie del cuerpo, es la misma en todas las direcciones a algún punto dentro del fluido y es la misma en todos los puntos de igual profundidad. La presión a algún punto en el agua es entonces igual al gradiente en psi (pounds per square inch) per ft (foot) de profundidad multiplicado por la altura de la columna de agua en pies.

Frecuentemente el agua almacenada en el yacimiento petrolero es salobre en la cual varían las concentraciones de sales minerales.

## II.2- FENÓMENO DE COMPACTACIÓN

Los ambientes en condiciones normales, se deben a una sedimentación bien compactada, que al aumentar el peso de las capas superiores expulsan agua congénita, por lo tanto, se dice que la porosidad decrece por la compactación con la profundidad. Por otra parte, en condiciones anormales el agua congénita no es desalojada y el proceso de compactación es alterado ocasionando que la porosidad no disminuya: en la mayoría de los casos la porosidad se incrementará en la parte de las geopresiones altas.

Mientras el agua contenida en los espacios porosos sea expulsada por el proceso sedimentario, estaremos hablando de una presión de formación hidrostática. Cuando el agua no es exprimida hacia afuera, los granos sedimentarios no podrán ser compactados

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

debido a la incompresibilidad de ésta. El soporte mayor de sobrecarga es entonces transferido de la matriz de la roca al fluido. La presión del fluido será mayor que la hidrostática y se tendrá como resultado una geopresión.

El gradiente debido a la carga de presión de compactación ejercida por una columna de roca es aproximadamente de 1 psi por ft de altura o 100 psi por 100 pies de profundidad, el cual es más significativo que el gradiente de presión hidrostática. Esta carga de presión también es llamada gradiente de presión litostática, gradiente de presión geostática, gradiente de presión de tierra, gradiente de presión de sobrecarga o gradiente de presión de roca.

La diferencia que existe entre presión del fluido y presión litostática, es que la presión del fluido es transmitida a través de los poros llenos de fluido en las rocas, mientras que la presión litostática es transmitida a través de las partículas minerales en contacto.

### 11.3- EL FENOMENO DE OSMOSIS

La operación del fenómeno osmótico es el siguiente: Cuando lutitas están separadas por dos acuíferos a gran distancia con diferente concentración salina, el agua del acuífero con baja concentración salina pasa a través de las capas de arcilla y se introduce al acuífero de alta concentración salina. Este proceso continuará hasta que la presión del acuífero de alta concentración es suficiente para resistir el movimiento del fluido y equilibrar esta reacción. La lutita es permeable para el agua dulce pero no para el agua con sal. El agua se mueve a través de la lutita para diluir el acuífero de mayor salinidad hasta detenerse por la baja presión en la lutita. El movimiento del agua adicional dentro del acuífero eleva la presión y ésta se suma a la presión del depósito.

### 11.4- CAMBIOS DE TEMPERATURA

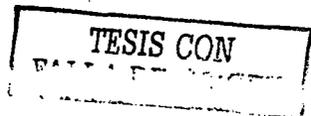
Los cambios en la temperatura producen cambios en la presión en los fluidos. Un incremento de temperatura produce una expansión en el aceite, gas y agua, mayor que en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

la roca, y si la trampa de hidrocarburos esta relativamente sellada no existiendo espacios adicionales disponibles en la roca almacenadora, resultaría un incremento en la presión del fluido.

## II.5- PRECIPITACIÓN SECUNDARIA O CEMENTACIÓN

En algunas rocas almacenadoras, los minerales originales han sido particularmente reconstituídos y recristalizados, y se han formado minerales secundarios donde ha existido más deposición que solución, o bien como resultado, ha habido un decremento de la porosidad, lo cual es un sello; existe así un incremento en la presión del fluido. Por otro lado cuando la solución es mayor que la deposición, resulta un incremento en el espacio poroso y hay un decremento en la presión del fluido.



### CAPITULO III.- METODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LAS PRESIONES ANORMALES

Con la información de la exploración sísmica y de la perforación se pueden aplicar varios métodos para conocer las regiones asociadas a presiones anormales y de fracturamiento en el subsuelo y que a continuación se describen:

III.1 Historia de lodos de perforación y reporte de pozos ya perforados.

III.2 Correlación geológica.

III.3 Evaluación con Registros Geofísicos de Pozos.

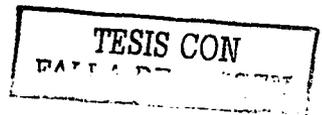
El Registro de Análisis de Velocidad VELAN que será explicado detalladamente en el siguiente capítulo.

#### III.1- HISTORIA DE LODOS DE PERFORACIÓN Y REPORTES DE POZOS YA PERFORADOS

Este método se basa en los antecedentes de pozos ya perforados reportados en la bitácora del perforador de pozos, principalmente aquellos que han presentado algún problema durante su perforación como son: reventones, pérdidas de circulación, pegaduras diferenciales, gasificación en la columna de lodo, etc... a medida que se tenga mayor información de pozos perforados en la zona, se tendrá una información más detallada para la detección de zonas de presiones anormales.

#### III.2- CORRELACIÓN GEOLÓGICA

En áreas donde ya se conoce la columna estratigráfica gracias a que se tiene la información de pozos ya perforados, se puede realizar una correlación de la información tal como el tipo de formación, echados, columna estratigráfica, estructuras, etc. para extrapolar y conocer las profundidades de las posibles zonas geopresionadas.



### III.3- EVALUACION CON REGISTROS GEOFISICOS DE POZOS.

Los Registros Geofísicos de Pozos son algunos de los mejores métodos empleados para la evaluación predictiva de las presiones anormales antes de la perforación en áreas nuevas.

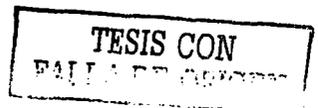
Estos registros se corren obviamente, después de haber perforado un intervalo o parte del pozo, por lo que se considera una información posterior para la detección de presiones, además de que esta información se usa para la planeación de programas de la perforación de futuros pozos.

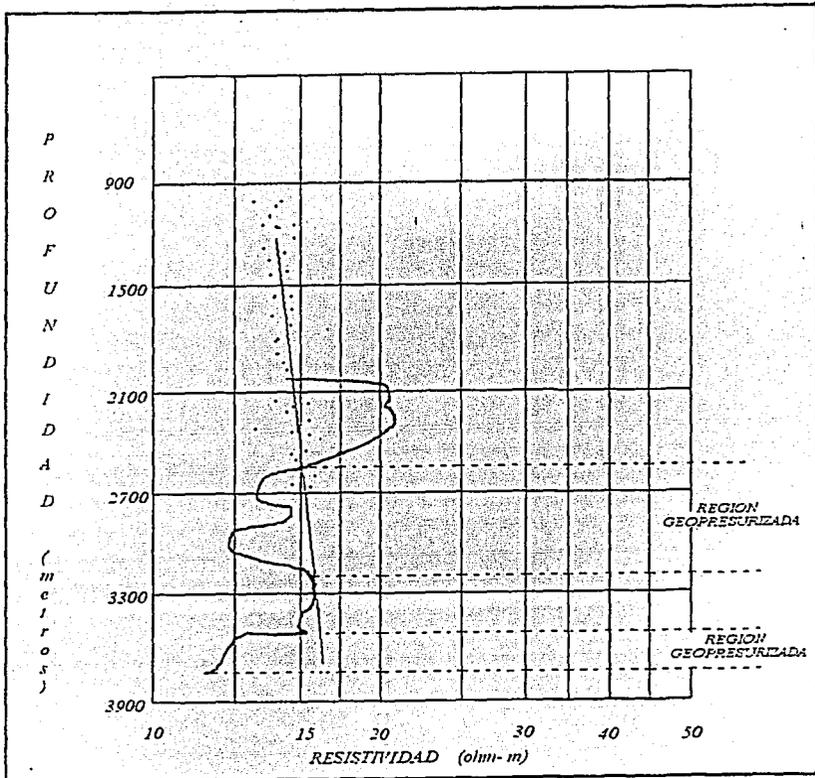
Dependiendo de las condiciones del pozo y de los objetivos, unos registros son más usados que otros, siendo algunos más confiables en determinadas zonas. Como ejemplo, en áreas de las costas del Golfo de México, que son secuencias de arenas-lutitas del Terciario: la evaluación de las presiones es mejor en el registro sísmico.

La gran cantidad de estudios realizados ha demostrado que la tendencia de la compactación normal tiene la forma de una función logarítmica y en una gráfica de papel semilogarítmico, adquiere la de una recta Hottman y Johnson (1967).

Así mismo Hottman y Johnson (1967) observaron que el grado de compactación puede ser estimado mediante registros que midieran la resistividad de las lutitas. Las lutitas sobrepresionadas son más conductivas a la electricidad (por su baja resistividad) porque contienen mayores volúmenes de agua salada, entre los espacios porosos, que los que tendrían las lutitas normales, a la misma profundidad. Estos factores causan una correspondiente respuesta en los registros eléctricos de inducción.

Los valores de la resistividad o conductividad pueden ser graficados contra la profundidad en papel semilogarítmico, para determinar zonas de alta presión, así, las presiones de las formaciones porosas pueden ser estimadas a partir de la desviación de los valores de la tendencia normal figura 3.1.





**FIGURA 3.1** Gráfica de resistividad V's Profundidad en las lutitas  
 La gráfica nos representa la tendencia normal de resistividad  
 ya su vez nos dará información sobre presión anormal el registro  
 de resistividad para el área de la Sonda de Campeche

TESIS CON  
 DATA DE ORIGEN

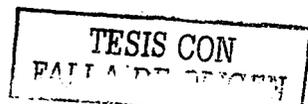
A continuación se refieren los registros geofísicos de pozos que debido a las experiencias en las regiones petroleras mexicanas que más han mostrado contribuciones importantes para las observaciones en zonas geopresurizadas.

#### a) REGISTROS ACUSTICOS

Algunos registros geofísicos de pozos fueron desarrollados en primera instancia como apoyo para la interpretación de datos sísmicos, pero se les ha dado una mejor utilidad en la determinación de la porosidad de las rocas. Este tipo de registro se basa en la medición del tiempo de tránsito de un impulso sónico a través de la roca en un radio desde el pozo de uno a tres pies. El radio de propagación de las ondas compresionales a través de la roca depende de la composición de la matriz de la roca y de los fluidos que contiene, es decir, la porosidad. Dentro de esta clase de registros acústicos tenemos el registro sonico de porosidad. Este registro se utiliza primordialmente para obtener la porosidad de la formación. Este registro se corre en agujero abierto, y consiste en enviar un tren de ondas acústicas que viajan a través de la formación, los tiempos registrados de estas ondas son proporcionales a la porosidad de la formación.

El registro sónico de porosidad es de gran importancia para la detección de zonas de presión anormal, porque la velocidad del sonido, en una parte de la columna de rocas, aumenta al incrementarse la diferencia de presión que ejerce la carga de los sedimentos y en consecuencia, la presión de los fluidos confinados en el espacio poroso. Y si se incrementa la diferencia de presión citada esto nos indicaría que existe probablemente una zona de presión anormal.

El principio y operación de la herramienta para este registro consta de una sonda de material aislante acústico; la sonda esta compuesta de dos transmisores de ondas acústicas y cuatro receptores con lo que se mide el tiempo de tránsito  $t$ , que tarda la onda acústica en recorrer, a través de la formación, una distancia igual o mayor a la separación entre los receptores. La onda acústica al llegar al primer receptor, hace



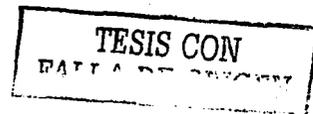
funcionar un mecanismo de tiempo que se cierra automáticamente cuando esta llega al segundo receptor registrándose entonces el intervalo de tiempo  $dt$ . El intervalo de tiempo de tránsito se registra en microsegundos por pie (  $\mu\text{seg/ft}$  ).

## b) REGISTROS RADIOACTIVOS

Los registros radioactivos contienen dos contadores de radioactividad y una fuente de neutrones de alta energía; el equipo superficial está diseñado para traducir las relaciones de cuentas de un registro continuo. Se registran dos curvas. Una es de respuesta del contador de radiaciones en la sonda debida a la radiación natural atómica que está presente en cantidades diferentes en todas las rocas sedimentarias. Esta curva "neutronica" se utiliza para distinguir las litologías como lutitas, areniscas y calizas. Es por lo tanto, una curva de litología parecida a la de potencial espontaneo (SP) y se utiliza a menudo para sustituirla cuando esta no tiene buena definición. La segunda curva que se registra es la respuesta de un contador de radiaciones de bombardeo a las formaciones por neutrones de alta energía. La curva de neutrones es muy sensitiva a la cantidad de hidrógeno que rodea a la sonda y por inferencia mide porosidad.

Dentro de estos registros radiactivos tenemos: el registro de densidad compensada. Las condiciones para correrse pueden ser las que se presentan en agujeros llenos de lodo o en agujeros vacíos. Por medio de este registro se obtiene directamente la densidad total de la formación. Es uno de los registros llamados de porosidad, ya que se pueden obtener valores de la porosidad directamente en función de la densidad.

El registro de densidad compensada se obtiene por medio de una sonda que va en contacto con la pared del pozo. Esta consta de una fuente emisora de rayos gama que va colocada en la parte inferior y dos detectores que están colocados a diferentes distancias de la fuente. Los tres elementos (fuente y detectores), están colocados en un patín, el cual contiene unas ventanas o aberturas frente a cada una de ellos, para que estén en contacto directo con la formación.



Los rayos gama que tienen la particularidad de viajar en línea recta, hasta que son desviados, absorbidos o moderados por la formación. Debido a que el material de que esta constituida la roca de la formación, tiene una cierta densidad electrónica, entre mayor sea la densidad total de la roca, mayor será su densidad electrónica. La fuente emite rayos gama, los cuales chocan con los electrones de la formación y son desviados o pierden algo de energía; debido a esto no todos los electrones alcanzan a llegar a los detectores, por lo tanto entre mayor sea la densidad del material de la formación mayor será la posibilidad de que los rayos colisionen pierdan energía o sean capturados, de tal manera que los rayos recibidos por el detector, serán en menor cantidad que los emitidos originalmente por la fuente.

Podemos concluir que la intensidad de los rayos gama registrados por los detectores, será inversamente proporcional a la densidad de la formación. Con este registro y mediante una calibración de la sonda con materiales de densidad conocida se obtienen valores directos de la densidad de la formación en vez de valores de radioactividad.

Este registro se encuentra comúnmente constituido por dos pistas, en una de ellas se presenta una curva de la densidad total de la formación, y en la otra, la curva de compensación o sea la conexión que automáticamente se usa para obtener la densidad de la formación. En ocasiones suele presentarse también un registro de calibración de agujero, presentándose junto con una calibración de rayos gama. El registro de densidad proporciona una excelente correlación de la compactación asociada a la presión, ya sea normal o anormal, de las lutitas. Generalmente cuando se tiene un decremento en la tendencia normal de compactación indica la presencia de sobrepresiones.

#### c) REGISTRO DE POTENCIAL ESPONTANEO (SP)

La diferencia de potencial que existe entre un electrodo colocado en la superficie del suelo, y otro electrodo móvil en el lodo dentro del pozo, se conoce como potencial

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

espontáneo. La presentación de la curva de potencial esta situada en la pista izquierda de la película del registro. La línea correspondiente al potencial de las lutitas que por lo general se mantiene prácticamente constante en tramos grandes la llamamos línea base de las lutitas, es a partir de esta línea que se pueden hacer lecturas de potencial frente a las capas porosas permeables, esto significa que la curva del SP en el registro tiene punto cero. El potencial puede ser positivo o negativo según se desplace la curva, hacia la izquierda o hacia la derecha de la línea base de lutitas. La curva de potencial espontáneo es importante para poder determinar información sobre la permeabilidad, de la roca, es por ello que podemos relacionarlo con las zonas de presión anormal.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

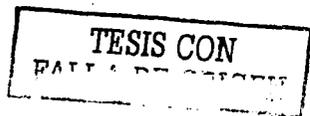
## CAPITULO IV.- ANÁLISIS DEL MÉTODO SÍSMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRESIONES ANORMALES

### IV.1- ANTECEDENTES DE LOS METODOS DE ESTUDIO IV.2- METODO DE PENNEBAKER

Es bien conocido que Pennebaker (1968) es el primer autor que trabajó para predecir y cuantificar las zonas de presión anormal y el gradiente de fractura a partir de la información sísmica, para efectuar la planeación de la perforación de pozos exploratorios. Este autor utilizó las diferencias de la velocidad de intervalo que existen entre los diferentes estratos ó formaciones del subsuelo y las transformó en un perfil de tiempo de tránsito promedio, el cual es semejante a un registro sonico promediado en intervalos de 200 a 500 metros. Este autor llevó a cabo sus estudios mediante una gran cantidad de registros de velocidad, densidad, inducción, pruebas de formación, registros de presión de fondo, etc... de más de 350 pozos perforados del Terciario, en la cuenca de las costas del NW del Golfo de México, gracias a este análisis le permitió conocer mejor el comportamiento de la velocidad de intervalo en las rocas considerando las siguientes características como son: la edad geológica, la litología y la presión de formación.

También es conocido que L. Y. Faust, (1950) es otro autor que determinó que la velocidad de intervalo varía exponencialmente con la profundidad quedando representada la variación por la siguiente expresión en función al tiempo de tránsito (inverso de la velocidad de intervalo).

$$T = K Z^{1/2} \quad (4.1)$$



Donde:

K= velocidad de intervalo

Z= profundidad

N= 4 y 19 (valor tomado en ese rango, para secuencias de lutitas=4)

T= tiempo de tránsito

Si graficamos esta ecuación en escala logarítmica se puede apreciar la tendencia a una línea recta con una pendiente igual a  $\frac{1}{4}$ , algo que demostró Pennebaker, y, que esto se cumple si se consideran zonas de arenas y lutitas.

De la ecuación (4.1) se sustituye K por el producto de P, L y E que son las constantes que intervienen en la velocidad de intervalo, quedando la siguiente expresión para el tiempo de tránsito:

$$T = P L E Z^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

Donde :

P= presión de formación

L= litología

E= edad geológica

Z= profundidad

T= tiempo de tránsito

Con esta ecuación se demuestra que el tiempo de tránsito decrece linealmente con la profundidad al graficarse en escala logarítmica y la pendiente de la recta es de  $\frac{1}{4}$ , por lo que la variación de esta tendencia refleja una anomalía que puede deberse a cualquiera de las constantes involucradas en la expresión (4.2). Más sin embargo, es posible determinar cual es la causa de la anomalía.

TESIS CON  
FECHA DE ENTREGA

Retomando las características señaladas por Pennebaker (OpCit) que nos da la información de la presión anormal:

a) Comportamiento debido a la edad geológica de las rocas. Se ha comprobado que para la región del NW del Golfo hay una diferencia en el tiempo de tránsito entre los pozos de zonas marinas y los continentales, siendo mayor el tiempo de tránsito en el primer caso debido a que están menos compactadas las formaciones por ser más jóvenes.

Pennebaker muestra un ejemplo de dos pozos perforados A y B, en donde el pozo A penetró en el Plioceno Inferior y el Mioceno Superior, de una edad geológica estimada en 8-10 millones de años en la zona continental; a la misma profundidad el pozo B que se ubica en la zona marina, obteniéndose así las pendientes de la tendencia de depósitos las cuales resultaron ser iguales, pero el tiempo de tránsito es mayor en el pozo B con edades más recientes (5 millones de años). Ambos pozos terrestre y marino son ubicados en Texas y Louisiana, respectivamente.

Como podemos observar en la gráfica de la figura 4.1 la variación de la recta por edad geológica esta dado por una familia de rectas paralelas en forma parecida al cambio litológico.

b) Interpretación del comportamiento producido por el cambio litológico. Este es estimado cuando la velocidad de intervalo atraviesa secciones de lutita limpia por el cual sufre una disminución de velocidad aparentando ser una zona de presión anormal, lo que elimina esta posibilidad es que la tendencia regional de la recta sigue teniendo una pendiente de  $\frac{1}{4}$  solo se encuentra desfasada de la original, tal como se observa en la figura 4.1. De manera similar se tiene un comportamiento en las rocas carbonatadas, solo que su desfasamiento es hacia la izquierda, pero sigue siendo paralela a la original, tal como se aprecia en la figura 4.2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

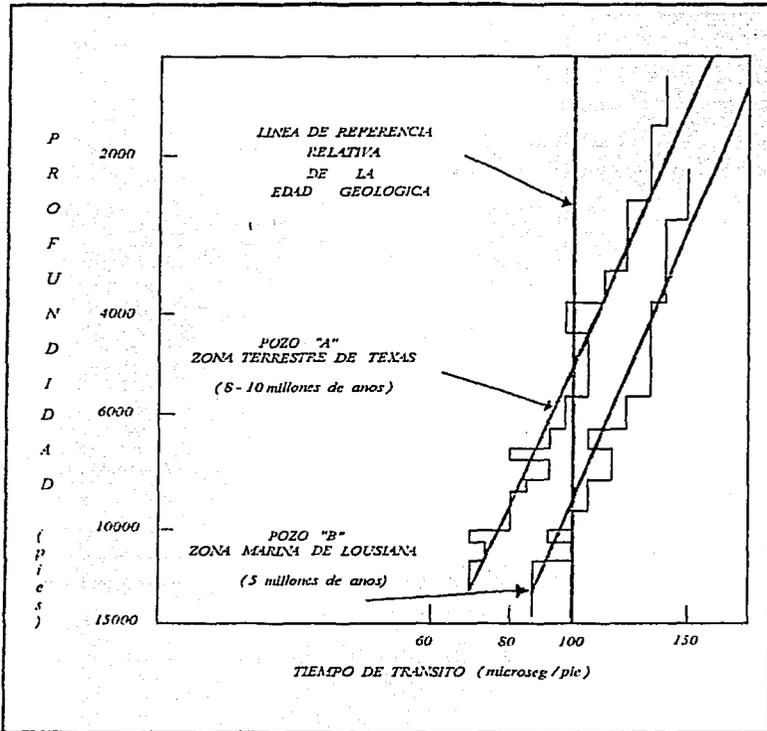


FIGURA 4.1 Diferencia en la tendencia general en el tiempo de tránsito entre un pozo marino y uno terrestre de acuerdo con Fennebaker (1968)

TESIS CON  
 FALTA DE PAGINA

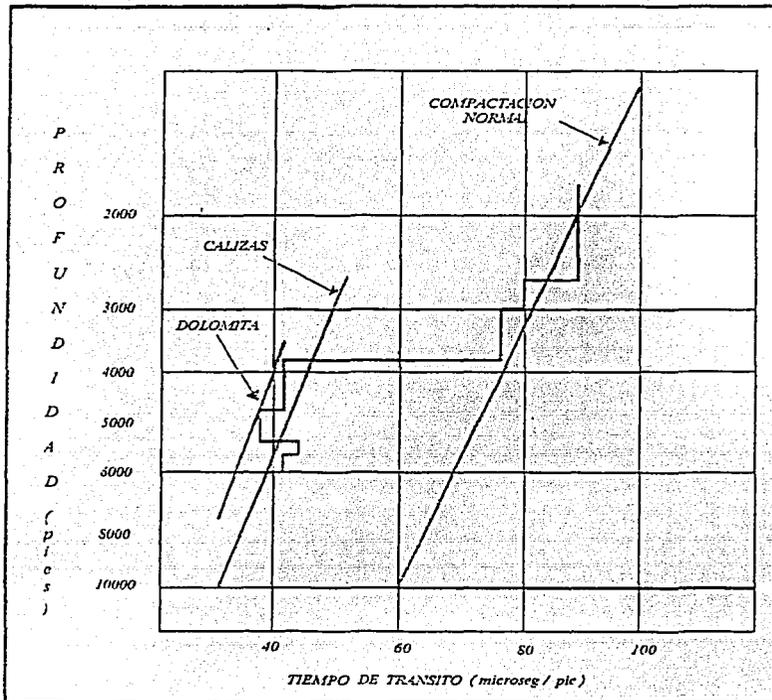


FIGURA 4.2 Comportamiento en la edad geológica de las rocas (Pennebaker, 1965), gráfica que representa la variación de la tendencia de la compactación normal de diferentes tipos de roca

c) Comportamiento producido por la presión anormal. Por medio de estudios geofísicos de sísmica de reflexión en las áreas referidas se ha observado una disminución súbita en la velocidad de intervalo a partir de cierta profundidad, que coincide en muchas ocasiones con la cima de ciertas formaciones como son la Frio, Vicksburg, etc.. estas inversiones en la velocidad de intervalo definen zonas de presión anormal. El hecho de que la velocidad de intervalo disminuya, es por la presencia de formaciones menos compactadas y más porosas.

También se determinó que el grado de variación de la tendencia de la presión normal es proporcional a la magnitud de la presión anormal.

Los primeros en desarrollar el cálculo de la presión anormal son Hottman y Johnson, en 1965. Pennebaker toma en cuenta el método gráfico de Hottman y Johnson (1965) para la determinación de la presión anormal, que consiste en una familia de rectas paralelas de  $\frac{1}{4}$  de pendiente impresas en una mica transparente, la cual se sobrepone a la gráfica de tiempo de tránsito, tal como se muestra en la figura 4.3, donde se obtienen directamente los valores de la presión anormal transformados en densidad de lodo.

#### IV.3- METODO DE BEN EATON

Este método determina una zona de presión anormal tomando como referencia la resistividad, conductividad, tiempo de tránsito, y el exponente  $dc$ , de donde se obtiene como resultado cuatro ecuaciones para predecirla.

Como antecedente se tienen los trabajos de Hottman y Johnson (1965) que determinan las presiones anormales por métodos gráficos utilizando datos de registros de inducción y sonicos el problema radica en que solo es aplicable en el área donde fueron desarrollados.

Hottman y Johnson encontraron la relación que existe entre los registros geofísicos y las zonas presurizadas. determinaron que la roca tiene mayor o menor resistividad dependiendo del contenido de agua intersticial y por lo tanto el grado de compactación. Con los

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

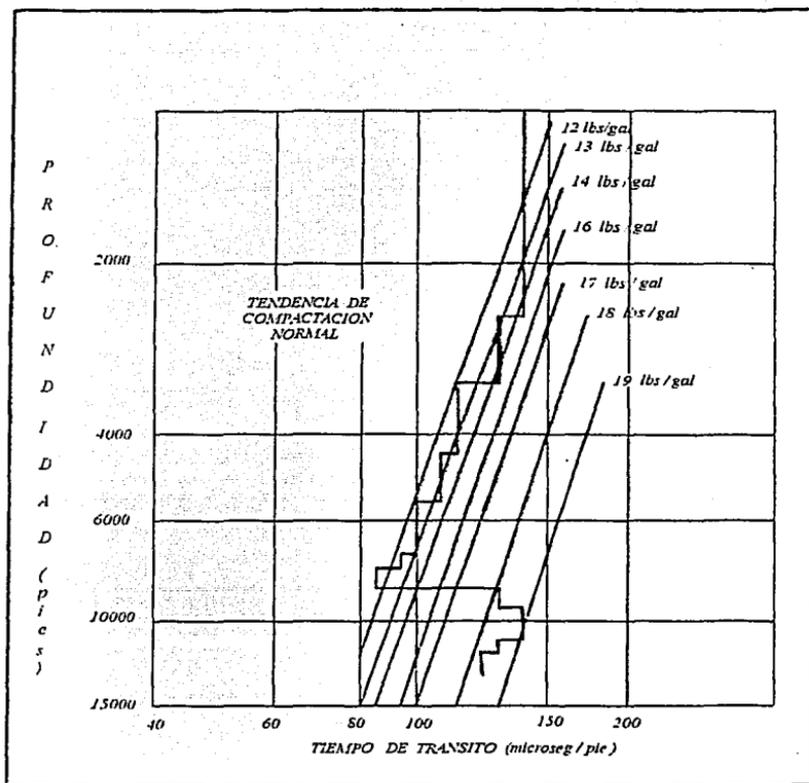


FIGURA 4.3 Añudo gráfico de Pennebaker (1968) para cuantificar la zona de presión anormal, de la cual las líneas interpretativas nos sugieren la densidad de los fluidos de perforación para el programa de lodos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

estudios realizados se encontró que la resistividad varía con la profundidad de manera gradual y si se grafica en escala semilogarítmica se obtiene una recta que representa la tendencia normal de compactación en la cual, un decremento de la resistividad marcaría una zona de presión anormal.

Los mismos autores trabajando con datos de presión de formación reales y registros eléctricos medidos en una gran cantidad de pozos (Texas y Louisiana, EUA) proporcionaron una gráfica que permite cuantificar, mediante comparación, la zona de presión anormal a partir del registro eléctrico del pozo figura 4.4.

Tomando como referencia el mismo criterio desarrollan una gráfica donde se relaciona el tiempo de tránsito del registro sonico con el gradiente de presión de formación figura (4.5).

Si observamos las figuras 4.4 y 4.5 se aprecia una dispersión de los datos reales que producen un error del 10%. Ben Eaton encontró que este error era debido a que se consideró un gradiente de sobrecarga constante.

Las cuatro ecuaciones que establecen la relación entre los registros geofísicos y las zonas geopresurizadas son las siguientes:

$$\frac{P}{D} = F \left( \frac{R_{\text{normal}}}{R_{\text{observada}}} \right) \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\frac{P}{D} = F \left( \frac{\delta T_{\text{observada}}}{\delta T_{\text{normal}}} \right) \dots \dots \dots (4.4)$$

$$\frac{R_{\text{normal}}}{R_{\text{observada}}} = F \left[ \frac{P}{D} \right] \dots \dots \dots (4.5)$$

$$\delta T_{\text{observada}} - \delta T_{\text{normal}} = F \left[ \frac{P}{D} \right] \dots \dots \dots (4.6)$$

Donde :  $P/D$  = Gradiente de presión de formación (psi/ft)

Aplicando la ecuación de Hubbert y Rubey (1959) que define la presión de sobrecarga:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

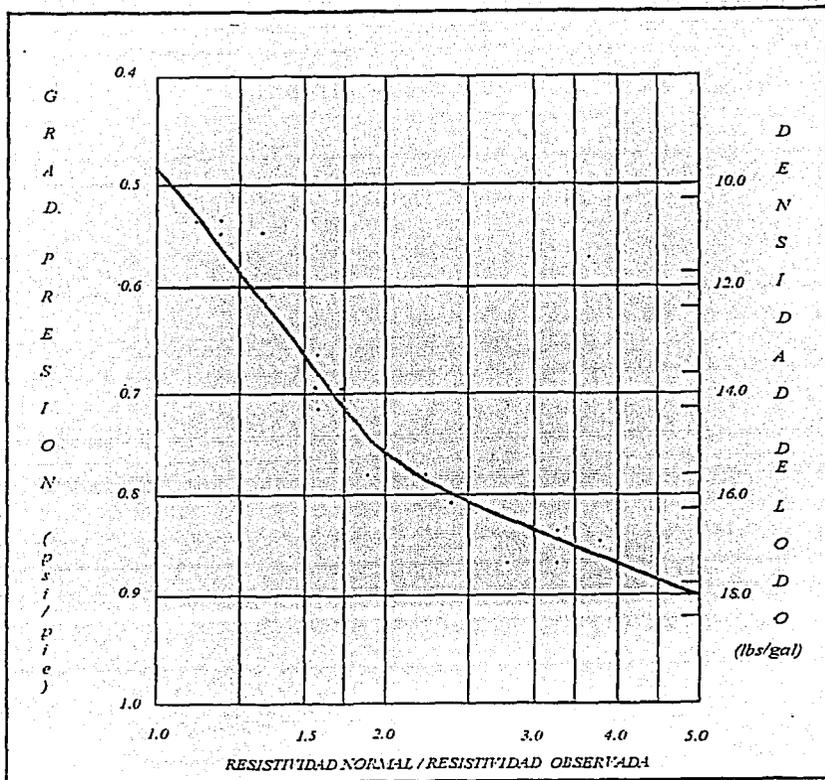


FIGURA 4.4 Correlación de resistividad contra gradiente de presión de Holtman y Johnson (1963) para la región de Texas-Louisiana. La curva nos da la información sobre la densidad de lodo recomendable a partir de la cual se hace el programa de lodos de perforación

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

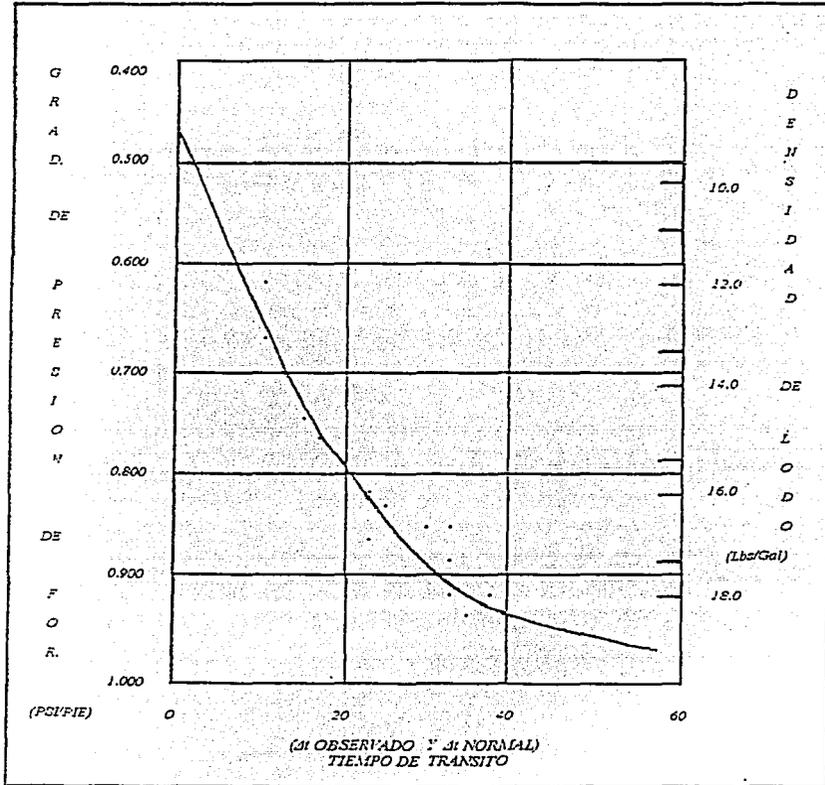


FIGURA 4.5 Correlación de diferencia de tiempo de tránsito (inverso de la velocidad de intervalo) y el gradiente de presión y programa de lodos, para la región de Texas-Louisiana. ECA de Hotman y Johnson (1965)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$S = P + \sigma \dots\dots\dots(4.7)$$

Donde:

S= presión de sobrecarga

P= presión de formación

$\sigma$ = esfuerzo matricial de la roca

Despejando la presión de formación P y dividiendo entre la profundidad D la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{P}{D} = \frac{S}{D} - \frac{\sigma}{D} \dots\dots\dots(4.8)$$

• O sea:

$$\frac{P}{D} = F \left[ \frac{S}{D} - \frac{\sigma}{D} \right] \dots\dots\dots(4.9)$$

Ben Eaton combina las ecuaciones (4.9) y (4.5) así como las (4.9) y (4.6) encontrando de manera empírica unas ecuaciones que ajustan analíticamente las correlaciones de las figuras 4.4 y 4.5 de Hottmman y Johnson (1965):

Las ecuaciones (4.10) y (4.11) se reducen a la ecuación (4.8) cuando se trata de

$$\frac{P}{D} = \frac{S}{D} - 0.535 \left[ \frac{R_{\text{observada}}}{R_{\text{normal}}} \right]^{1.5} \dots\dots(4.10)$$

$$\frac{P}{D} = \frac{S}{D} - 0.535 \left[ \frac{\delta T_{\text{normal}}}{\delta T_{\text{observada}}} \right]^{3.75} \dots\dots(4.11)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

presión normal y si se asume el gradiente de sobrecarga igual a 1 psi/ft se tendrá:

$$\frac{P}{D} = 1 - 0.535(1)^{1.5}$$

$$\frac{P}{D} = 0.465$$

Por lo tanto  $\sigma/D$  esta representado por 0.535 psi/ft.

La aportación de Ben Eaton para cuantificar la presión anormal consistió en considerar el gradiente de presión variable y ecuaciones más exactas para su cálculo, tomando como referencia el análisis de una gran cantidad de datos reales de pozos y registros geofísicos.

Si consideramos una zona de presión normal y despejamos el gradiente de esfuerzo matricial la ecuación (4.8) quedaría:

$$\left[ \frac{\sigma}{D} \right]_{\text{normal}} = \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_{\text{normal}} \dots\dots\dots(4.12)$$

Para el gradiente de esfuerzo matricial de la roca en una zona de presión anormal considerando que  $(\sigma/D)_n = 0.535$  de la ecuación (4.12) aplicándolo a las ecuaciones (4.10) y (4.11) tenemos que:

$$\left[ \frac{\sigma}{D} \right]_{\text{anormal}} = \left[ \frac{S}{D} - \frac{P}{D_{\text{normal}}} \right] \left[ \frac{\delta \cdot T_n}{\delta \cdot T_o} \right]^{3.75} \dots\dots\dots(4.13)$$

$$\left[ \frac{\sigma}{D} \right]_{\text{anormal}} = \left[ \frac{S}{D} - \frac{P}{D_{\text{normal}}} \right] \left[ \frac{R_o}{R_n} \right]^{1.5} \dots\dots\dots(4.14)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.13) y (4.14) en (4.10) y (4.11) se llega a las ecuaciones que ajustan las curvas de las figuras 4.4 y 4.5 de Hottman y Johnson (1966).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{R_o}{R_n} \right]^{1.5} \dots\dots( 4.15 )$$

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{\delta T_n}{\delta T_o} \right]^{3.75} \dots\dots( 4.16 )$$

En el análisis que efectuó Ben Eaton determinó que los exponentes de las ecuaciones (4.15) y (4.16) deben ser corregidos ó adaptados con 1.2 y 3.0 respectivamente según fue demostrado en su aplicación. Estos exponentes se llaman de Ben Eaton y son diferentes porque dependen del área donde se utilizarían, los dos anteriores son para el área de Louisiana. Se ha comprobado que estos exponentes sirven también a otros campos presentando buenos resultados.

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{R_o}{R_n} \right]^{1.2} \dots\dots( 4.17 )$$

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{\delta T_n}{\delta T_o} \right]^{3.0} \dots\dots( 4.18 )$$

Utilizando un criterio similar Ben Eaton encontró las ecuaciones para cuantificar la zona geopresurizada a partir de la conductividad y de los parámetros de la perforación de pozos tales como (exponente dc):

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{C_n}{C_o} \right]^{1.2} \dots\dots( 4.19 )$$

$$\left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left[ \frac{P}{D} \right]_n \right] \left[ \frac{dc_o}{dc_n} \right]^{1.2} \dots\dots( 4.20 )$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Donde:  $dc_n$  = exponente "dc" normal

$dc_c$  = exponente "dc" calculado. (datos de perforación involucrados en exponente)

El exponente "d" es una técnica que sirve para identificar ambientes con altas presiones y se usa para compensar la variación de los parámetros que influyen en el ritmo de penetración, como son: la velocidad de penetración, el peso de la barrena, el diámetro de la barrena y la velocidad de la rotaria. Para normalizar el valor del exponente "d" debido a que se ve influenciado por las variaciones en el peso del lodo se emplea un parámetro modificado llamado exponente "dc".

#### IV.4- MÉTODO PARA DETERMINAR EL GRADIENTE DE SOBRECARGA CON DATOS SISMICOS (VELOCIDAD DE INTERVALO)

Para poder determinar el gradiente de sobrecarga recordemos que existe una asociación entre la velocidad y la densidad la cual si se representa en una escala logarítmica con una recta, por lo tanto, una relación entre estas dos variables queda expresada por una función de tipo exponencial desarrollada por Gardner (1974):

$$\delta = 0.23 V^{0.25}$$

donde:

$\delta$  = densidad

$V$  = velocidad de intervalo

Dicha expresión es conocida como Ecuación de Gardner.

La Ecuación de Gardner es utilizada mundialmente para calcular la densidad cuando no se tiene información de registros, por lo que conociendo la velocidad de intervalo obtenidos por el método de reflexión sísmica se encuentran resultados satisfactorios.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### IV.5- METODOLOGÍA PARA PREDECIR Y CUANTIFICAR LAS ZONAS DE ALTA PRESIÓN.

A continuación, se da la serie de pasos de Ben Eaton para determinar las zonas geoprezurizadas a partir del Análisis de Velocidad, con esta secuencia podemos predecir y cuantificar las zonas de alta presión:

- 1.- Realizar un VELAN a partir de los datos sísmicos obtenidos en el área de interés.
- 2.- Obtener la función de velocidad como interpretación del VELAN.
- 3.- Determinar la velocidad de intervalo, tiempo de tránsito y la profundidad de los cuerpos reflectantes con el programa de Ben Eaton.
- 4.- Determinar el gradiente de sobrecarga con los datos de velocidad de intervalo, ecuación de Gardner y profundidad con el programa de Ben Eaton.
- 5.- Representar en escala logarítmica el tiempo de tránsito contra profundidad, ajustando una recta, la cual representará una tendencia normal de compactación de las formaciones, donde quedará determinada cualitativamente la presión anormal.
- 6.- Evaluar la ecuación (4.18) de Ben Eaton para cuantificar la zona de presión anormal utilizando el programa de Ben Eaton.
- 7.- Deberá repetirse el paso anterior iterativamente hasta obtener un perfil ó curva de gradiente de presión de formación que nos de la suficiente información para determinar la zona geoprezurizada.

De esta manera podemos garantizar un control de calidad y obtener las ventajas que tenemos al utilizar esta metodología:

- Es el hecho de que la información sísmica obtenida permite llevar a cabo la planeación de la perforación del pozo con confianza para poder delimitar una zona de alta presión, la cual se incluirá en el programa de lodos.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- El método proporciona adicionalmente mayor información estructural para conocer los horizontes más profundos con problemas de presión anormal.
- Los datos que se obtienen a través de este método se pueden correlacionar con la información proporcionada por la sísmica del pozo, así como con todos los estudios de registros geofísicos de pozos realizados previamente.
- La profundidad a la cual se puede realizar el estudio puede ser mayor a 5000 metros.
- Con la aplicación de estos análisis se demuestra que al usar el método VELAN para la detección de presiones anormales da resultados muy satisfactorios en nuestro país.

## CAPITULO V.- APLICACIÓN DEL MÉTODO

Como ya sabemos por medio del método de las ecuaciones de C. Hewitt Dix (1955) podemos construir gráficas de velocidad de intervalo y tiempo de tránsito contra la profundidad. La velocidad de intervalo se describe como la velocidad promedio en el intervalo formado por dos superficies reflectoras y se obtiene a través de la velocidad aparente (velocidad medida en los sismogramas) y el tiempo doble de reflexión para cada reflector de la gráfica  $X^2 - T^2$  del método de perfiles de reflexión o mediante varios ensayos de VELAN elaborados por el Análisis Automático de Velocidad, esta es la base para determinar o conocer las zonas geoprezurizadas, y para el manejo de altas presiones con seguridad.

La predicción de estas zonas sobrepresionadas aun antes de la perforación exploratoria pueden ayudar a diseñar los programas de fluidos de perforación, para permitir una penetración segura en estas zonas y continuar la barrenación hasta las rocas con reservorios petroleros. Asimismo, en el diseño del programa de tuberías de revestimiento (ademe).

El ritmo cambiante en el depósito de una secuencia sedimentaria puede originar PRESIONES ANORMALES. Muchas cuencas Terciarias en el mundo tienen que pasar por una etapa relativamente rápida de sedimentación de rocas clásticas. En esta etapa los depósitos de lutitas lenticulares o cuerpos de arena son cubiertos por capas impermeables de montmorillonita (arcillas) o carbonatos: las cuales impiden la expulsión del agua, petróleo o gas atrapados, dando como resultado una capa por debajo de ellas, compactada o sobrepresionada. La presión de estos cuerpos lenticulares está en un rango del 70% al 95% del peso de la sobrecarga.

La interpretación espacial de datos sísmicos, puede dar una curva indicativa de las condiciones de la barrenación. Esta curva puede mostrar las formaciones anormales, donde las altas presiones tienen que afectar las propiedades de las rocas. Con información adicional del área de las zonas de presión alta, una vez evaluadas con el método aquí expuesto, se puede predecir con un 90% de confiabilidad y el peso del lodo se incrementará con al menos un equivalente de  $\frac{1}{2}$  ppg (pounds per gallon).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## V.1- PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El procedimiento normal usado para detectar zonas sobrepresionadas esta basado sobre los gráficos de velocidad de intervalo vs profundidad o tiempo de tránsito vs profundidad sobre el papel semilog o log-log.

La interpretación de estos datos en ocasiones pueden conducir a resultados dudosos o erróneos. Esto es desalentador y comprensible debido a los datos inapropiados como suele ocurrir con: parámetros usados en los análisis de velocidad sísmica, factores de trayectorias, anisotropía, efectos de echado, difracciones, multiples y cualquier energía coherente, fallas, errores en correcciones estáticas, etc...y para evitar esto también existe el control de calidad de los datos.

Como se ha mencionado anteriormente la herramienta básica, entre otras para predecir zonas de alta presión, es el Análisis de Velocidad Sísmica. La ecuación que relaciona la velocidad (VRMS, velocidad cuadrática media) con la distancia, esta expresada como:

$$T = T_0 + \left( \frac{x}{VRMS} \right)^2$$

T= tiempo total    T<sub>0</sub>=tiempo inicial    x= distancia    VRMS= velocidad cuadrática media

Para encontrar la velocidad VRMS se divide el P.M.C. (punto medio común) en ventanas y se aplican velocidades desde V<sub>i</sub> a V<sub>f</sub> con intervalos ΔV, a partir de estos valores se calculan las velocidades de intervalo y se obtienen las tendencias normales.

El procedimiento general para el cálculo de la velocidad de intervalo es el siguiente:

- I. Se leen los pares de tiempo y velocidad cuadrática media de apilamiento, en la figura 1.12 parte de la izquierda (Pag. 26).

Estos pares cumplen con:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- a) El producto tiempo y velocidad debe ser más grande para tiempos mayores.
- b) Las velocidades de intervalo deben de ser :
  - Arenas 1350-3800 m/s
  - Carbonatos < 6840 m/s o su equivalente en kfeet/seg
- c) Los tiempos deben de incrementarse en orden secuencial.
- d) El intervalo de tiempo, entre los pares debe ser mayor que 50 mseg.

En el cálculo de las velocidades los incrementos deben de ser de aproximadamente 15-25 m/s, posiblemente usar funciones de suavizamiento y ventanas cortas. Esto realiza la resolución necesaria para predecir las presiones y la litología.

- II. Se calculan las velocidades de intervalo a partir de las velocidades VRMS o de las velocidades promedio.
- III. Se calculan las profundidades.
- IV. Se gráfica en papel semilog o log-log los valores de profundidad vs velocidad de intervalo.
- V. Se traza una tendencia lineal sobre el gráfico del paso número cuatro a partir de la gráfica de compactación de lutitas se encuentra la expresión:

$$V_s = (V_{mat} P_c / A P_c + B) + V_{min}$$

Donde :  $V_s$  = Velocidad de lutita

$P_c$  = presión de compactación

$V_{mat}$  = velocidad de matriz

$V_{min}$  = Velocidad mínima

A y B = Coeficientes calculados por mínimos cuadrados.

- VI. Se calculan las densidades por medio de alguna de las siguientes formulas:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

GARDNER (1974)

$$\rho_G = 0.23 V^{0.25} \text{ gr / cm}^3, \text{ si } V = \text{feet / seg}$$

$$\rho_G = 0.31 V^{0.25} \text{ gr / cm}^3, \text{ si } V = \text{m / seg}$$

FILLIPPONE (1975)

$$\rho_F = 1.73 - 1.64 e^{-\frac{10000}{v}}, \text{ si } v = \text{feet / seg}$$

$$\rho_F = 1.73 - 1.64 e^{-\frac{3048}{v}}, \text{ si } v = \text{m / seg}$$

BELLOTI Y GIACCA (1978)

$$\rho_B = \rho_{mat} - 2.11 \times (1.0 - (V_i / V_{mat})) / (1.0 + (V_i / V_{mat}))$$

Si  $V = \text{m/seg}$

VII. Se calcula el gradiente hidrostático

$$G_H = (0.465 \text{ psi / ft})(\text{PROFUNDIDAD ft})$$

VIII. Se calcula Gradiente de Sobrecarga

$$G_{OIB} = \sum_{i=1}^n \rho_B * \Delta \text{Prof}_i / 10.0$$

$$G_{OIR} = G_H \cdot \rho_f \rho_{si}$$

$$G_{OIR} = \frac{1}{H} (0.44 H_1 v + \rho H^1)$$

$$G_{OIR} = (\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2 + \dots + \rho_n H_n) / (H_1 + H_2 + \dots + H_n)$$

$\Delta \text{Prof}_i = \text{incremento de profundidad}$ ,  $H = \text{profundidad}$ ,  $\rho = \text{densidad}$

IX. Se estima mediante la formula de la presión de formación

$$\frac{P}{D} = \frac{S}{D} - \left[ \frac{S}{D} - \left( \frac{P}{D} \right)_n \right] \left( \frac{\Delta T_n}{\Delta T_o} \right)^{3.0}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

O bien mediante la otra técnica que es la de Fillippone (1975)

$$FMPR = \frac{V_{max} - V_{int}}{V_{max} - V_{min}} \cdot G_{OV}$$

donde:

FMPR = Presión de Formación  $G_{OV}$  = Gradiente de fractura

$V_{max} = 1.4 V_o - 0.3KT$

$V_{min} = 0.7 V_o - 0.5KT$

$V_{int}$  = velocidad de intervalo

$V_o$  = Tiempo de intercepción de VRMS en  $T_o$

$K$  =  $\Delta VRMS / \Delta T$

$T$  = tiempo

X. Gradiente de Fractura.

$$GFR = G_H + [2\gamma / (1 - \gamma)] (G_{OV} - G_H) \dots\dots I$$

$$GFR = G_H + 2\gamma / (G_{OV} - G_H) \dots\dots\dots II$$

donde:

$\gamma$  = módulo de Poisson

GFR = gradiente de fractura

$G_H$  = gradiente hidrostático

$G_{OV}$  = gradiente de sobrecarga

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Existen cuatro reglas básicas para una evaluación práctica del gradiente de fractura.

1. Las formaciones plásticas tales como las lutitas, margas y sal tienen gradiente de fractura igual al gradiente de sobrecarga.
2. Las formaciones elásticas tales como arenas limpias o areniscas, carbonatos sin fracturas ( o microfracturas) tienen un módulo de Poisson igual a 0.25; para arenas lutíticas, areniscas o calizas a gran profundidad el módulo de Poisson es 0.28.
3. Cuando se planea un pozo exploratorio, debe ser considerada la posibilidad de encontrar un nivel elástico en cualquier profundidad. Por lo tanto, los cálculos de gradiente de fractura se realizan en todo el pozo asumiendo  $\gamma = 0.25$ ; conforme se van obteniendo más datos, el valor del módulo de Poisson va cambiando con la profundidad.
4. La segunda ecuación (II) del paso numero 10 es usada cuando el fluido de perforación es agua o cuando el fluido de perforación se filtra a formaciones altamente porosas o permeables.

X1. Cálculo del peso del lodo equivalente.

donde:

$$\rho_L = (H_{cp} - H_a) \rho_w + K H_{cp} (G_{ov} - \rho_w) / H_m + H_a + H_{cp}$$

$H_{cp}$  = profundidad del entubado (conductor pipe string)

$H_a$  = distancia entre la mesa rotatoria y el nivel del mar

$H_m$  = profundidad del nivel del mar

$G_{ov}$  = gradiente de sobrecarga

$\rho_L$  = densidad del lodo

$\rho_w$  = densidad de agua (1.03 gr/cc)

$K$  = factor de gradiente de fractura ( $2\nu / 1-\nu$ )

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$DRF = \frac{19.2 \text{ FMPR}}{\text{Prof}} \quad [\text{LIBRAS} / \text{GALON} ]$$

$$]DRF = \frac{23 \text{ FMPR}}{\text{Prof}} \quad [\text{GRAMOS} / \text{CC} ]$$

$$DRF = \frac{144 \text{ FMPR}}{\text{Prof}} \quad [\text{LIBRAS} / \text{PIES} \cdot \text{CUBICOS} ]$$

$$\rho_m = \frac{(\text{Prof} \times G_{FR})}{0.052 (\text{Prof} + Z)}$$

Donde:

Z= elevación arriba del datum a la línea del flujo del lodo (mud flowline)

DRF= densidad del fluido de barrenación

FMPR= presión de formación

G<sub>FR</sub> = gradiente de fractura

ρ<sub>m</sub> = densidad de matriz

Prof= profundidad b.m.r.

PRESIÓN DE COMPACTACIÓN

$$P_o = P_{ov} - P_p$$

P<sub>o</sub> = presión de compactación

P<sub>ov</sub> = presión de sobrecarga

P<sub>p</sub> = presión de poro.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla que ilustra las densidades de matriz y de fluido de diferentes tipos de roca.

TIPO DE ROCA	$d_m$ [gr / cm <sup>3</sup> ]	FLUIDO	$d_f$ [gr / cm <sup>3</sup> ]
Lutita	2.55	Agua dulce	1.00
Arenisca	2.65	Agua de mar	1.03
Caliza	2.71	Salmuera	1.07
Dolomita	2.87	Aceite	0.83-0.93
Halita	2.16	Gas	0.001-0.01

#### POROSIDAD

$$\phi = \frac{d_m - d_B}{d_m + d_F} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\phi = \frac{\text{espacio vacío en matriz}}{\text{volumen total de roca}}$$

$d_m$  = densidad de la matriz de roca

$d_B$  = densidad de la roca

$d_f$  = densidad del fluido de los poros

$$\phi = \Delta T - Tm_x / (\Delta T - \Delta Tm_x) \quad (5.2)$$

Para la porosidad de formaciones cementadas y compactas

$$\phi = 1.28 \Delta T - \Delta Tm_x / (\Delta T + \Delta Tf) \quad (5.3)$$

Para la porosidad de arenas sin cementar y lutitas.

T = tiempo de tránsito Tm<sub>x</sub> = tiempo de tránsito matriz Tf = tiempo de tránsito fluido

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Esta última ecuación es válida para porosidades de 0% -47% para arenas y 0% - 60% para lutitas.

TIPO DE ROCA	TIEMPO DE TRANSITO
Dolomitas	43.5 msec/ft
Calizas	43.5-47.5 msec/ft
Arenas	47.5-55.6 msec/ft
Lutitas	47.0 msec/ft

La porosidad es relacionada con la densidad por la ecuación

$$d = d_m(1 - \phi) + d_f \phi \dots \dots \dots (5.4)$$

d = densidad

d<sub>m</sub> = densidad de matriz

Las siguientes ecuaciones son obtenidas con la combinación de la ecuación 5.2 ,5.3 y 5.4 asumiendo d<sub>m</sub>=2.75 d<sub>f</sub>=1.03, ΔT<sub>mx</sub>=47 y ΔT<sub>f</sub>=200

$$d = 3.28 - (\Delta T/89)$$

para formaciones compactadas o cementadas

$$d = 2.75 - 2.11 (\Delta T - 53)/(\Delta T + 200)$$

para formaciones sin cementar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## V.2- APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA PRACTICA

La aplicación del método se realizó en 1986 en la región marina de la Sonda de Campeche, donde se habían encontrado las zonas de presiones anormales desde el primer pozo exploratorio CHAC-1 perforado en 1976. El procesamiento de los datos implicados, se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo bajo la orientación del Ingeniero Marco Antonio Flores .

En la región investigada se han tenido problemas durante la perforación de los pozos tanto de exploración como de producción por presiones anormales, teniendo en ocasiones que perforar un pozo gemelo y tener que cambiar el programa de perforación o detener por completo la perforación, como es el ejemplo del pozo YUM-2

Para la aplicación del método VELAN, en nuestro caso se trató una sección sísmica de longitud de 10 km con intervalos de separación entre CMP (Common Mid Point) de 25 mts. En la figura 5.1, se ilustra esa parte de la sección sísmica utilizada.

Los análisis sísmicos de velocidades se realizaron en la sección sísmica apilada con la corrección dinámica corregida por echados (DMO) realizadas en seis coberturas cada 50 CMPs, cuyos resultados se muestran en la figura 5.2

A partir de los análisis de velocidad se determinó su distribución espacial a lo largo de la línea sísmica, figura 5.3, observando un comportamiento de tendencia muy suave en la parte superior entre 0 y 2.0 seg. y también teniendo un gradiente VRMS de tendencia muy suave entre 2.0 y 4.0 seg. Este efecto en las velocidades VRMS tiene un comportamiento más notable cuando los convertimos a velocidades de intervalo observando velocidades de intervalo bajas entre 2.0 y 3.8 seg. figura 5.4 Con la información obtenida de los datos anteriores y los análisis de velocidad de intervalo cada 50 CMP graficados en escala semilogarítmica, figura 5.2, se

TESIS CON  
FALLA DE OPINION

DISTANCIA (Km)

78

KI - 101 KI - 1

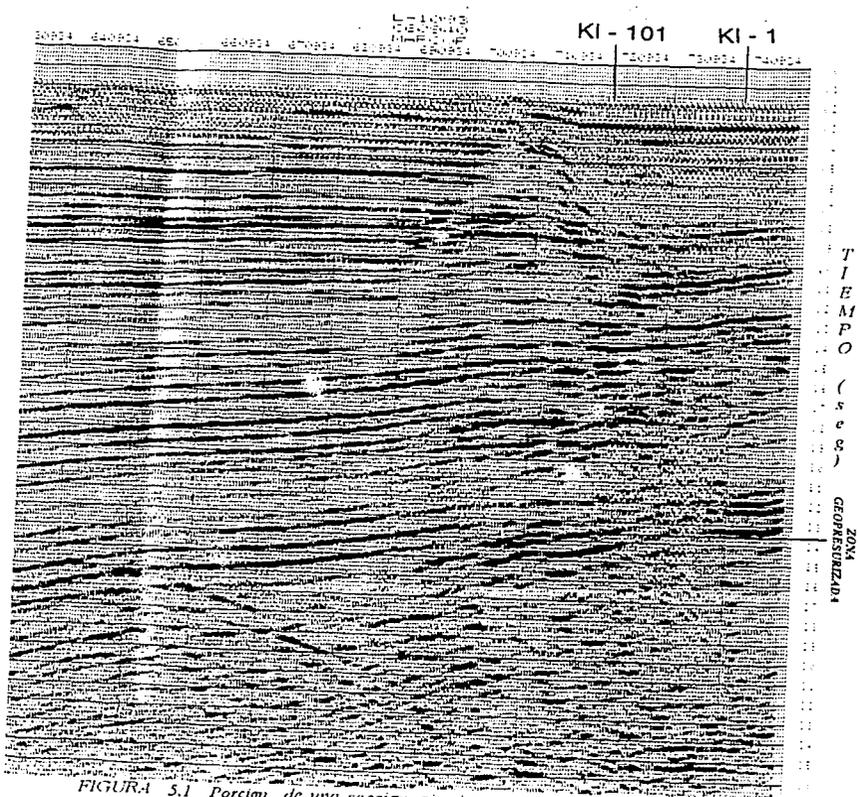
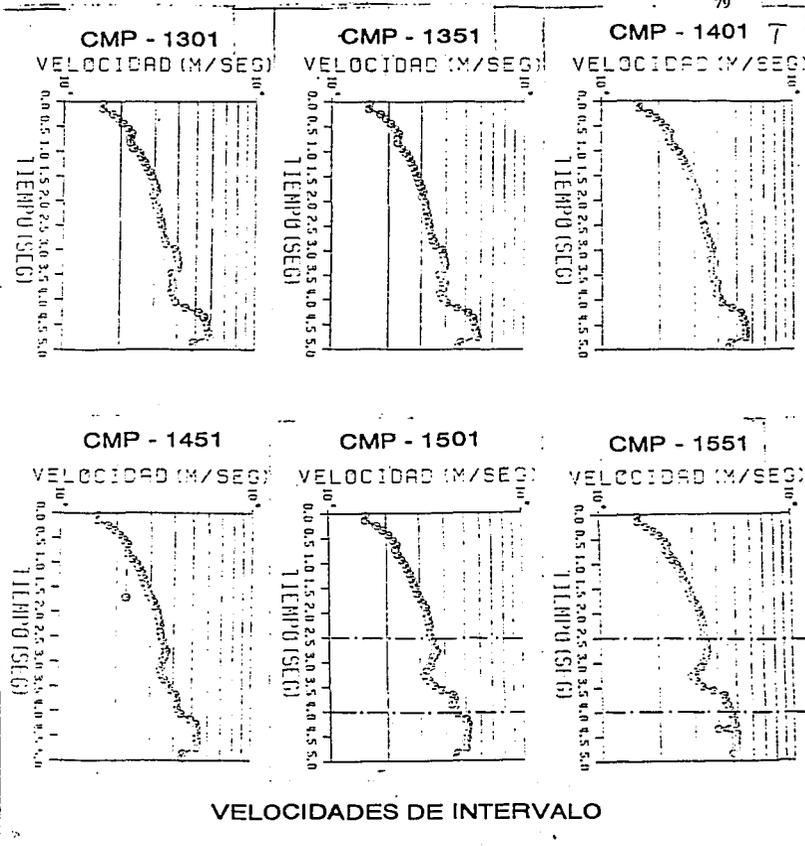


FIGURA 5.1 Porción de una sección sísmica que representa la ubicación de los pozos KI-1 y KI-101 en la Sonda de Campeche

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



VELOCIDADES DE INTERVALO

FIGURA 5.2 Aquí tenemos la representación de varios CMP (Punto Medio Común), si observamos detalladamente el CMP-1501 y CMP-1551 hay una inversión de velocidad mas pronunciada entre los 2.5 y 4.0 segundos, lo que nos sugiere una probable zona de presión anormal

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

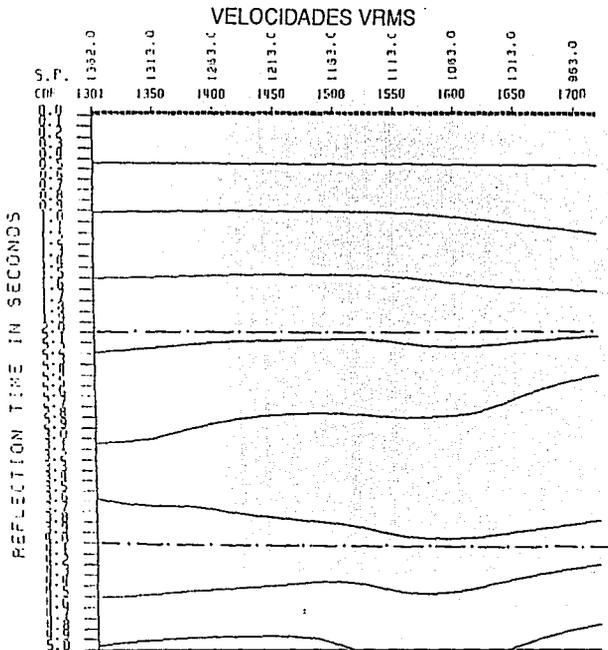


FIGURA 5.3 Representación gráfica de la línea de estudio en donde se muestra una tendencia más variable en el suavizamiento entre los 2.0 y 4.0 segundos de la velocidad cuadrática media de la región estudiada en la Sonda de Campeche

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

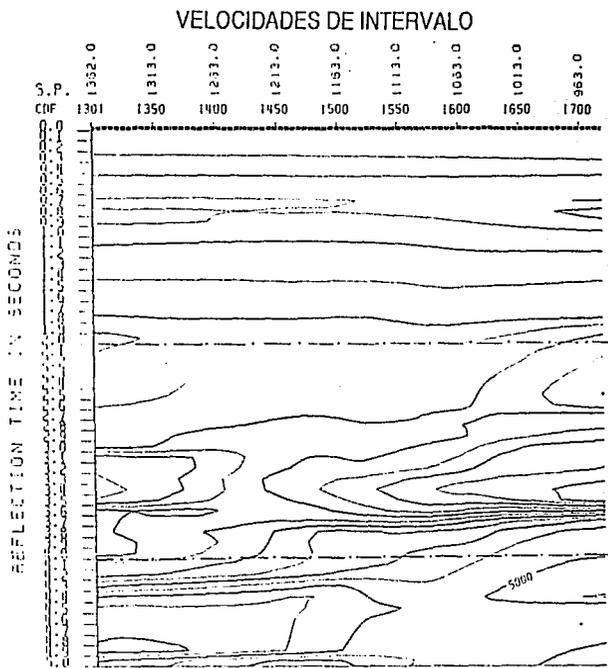


FIGURA 5.4 En esta gráfica podemos observar una disminución de la velocidad de intervalo lo cual nos indica una zona de alta presión entre 2.0 v 3.8 segundos, en la zona estudiada de la Sonda de Campeche

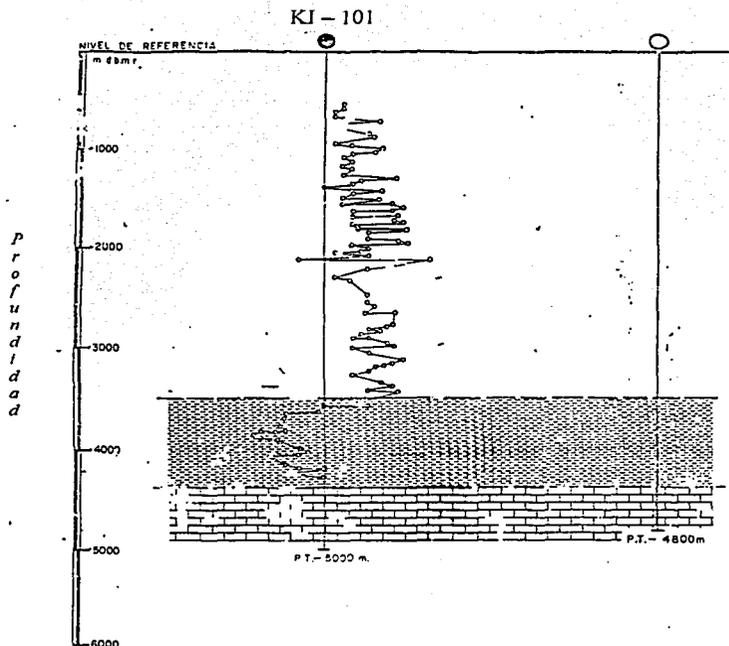
puede observar que estos siguen una tendencia lineal en los primeros 2 segundos y a los 3.5 segundos teniendo una desviación a la izquierda la cual asociamos a la zona de presión anormal en los sedimentos del Terciario de edad del Mioceno Superior o Mioceno Medio; la figura 5.5 corrobora la alta presión en esta parte de la columna geológica.

Siguiendo la metodología del capítulo V se determinaron las densidades de lodo a emplear durante la perforación, de esta gráfica resalta una zona donde debemos de emplear una densidad de hasta 15 lbs/gal para no tener problemas durante dicha operación. Los resultados obtenidos en esta metodología fueron comprobados con dos pozos ya perforados KI-101 y KI-1 en los cuales se presentaron zonas de presión anormal. Los nombres de los pozos no se dan por confidencialidad.

La determinación de las zonas de presión anormal a partir de los registros geofísicos, se pueden observar en las figuras 5.6 y 5.7, corroborando la confiabilidad del método que empleamos.

Esa misma metodología se sigue empleando en cada proposición de localizaciones exploratorias a perforar, en la región marina en la Sonda de Campeche.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIGURA 5.5 SECCION TRANSVERSAL ESQUEMATICA DE ZONA GEOPRESIONADA**  
 Se muestra que a la profundidad entre los 3500 y  
 4300 m tenemos una zona de alta presión que corresponde a la  
 edad del Mioceno en la Sonda de Campeche

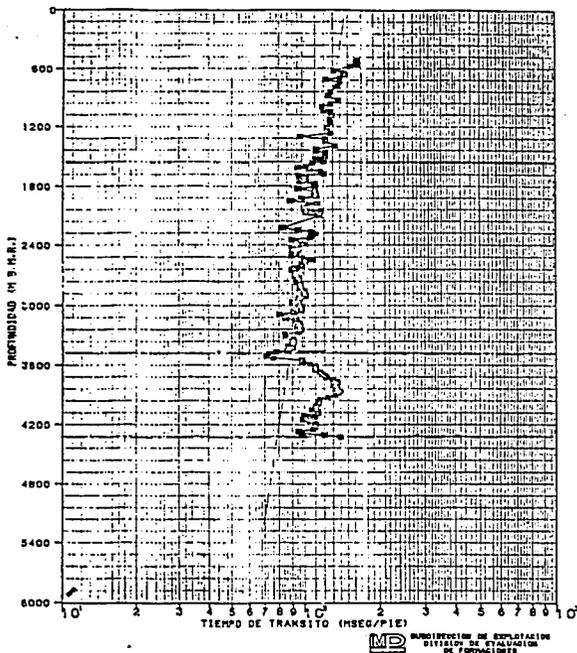
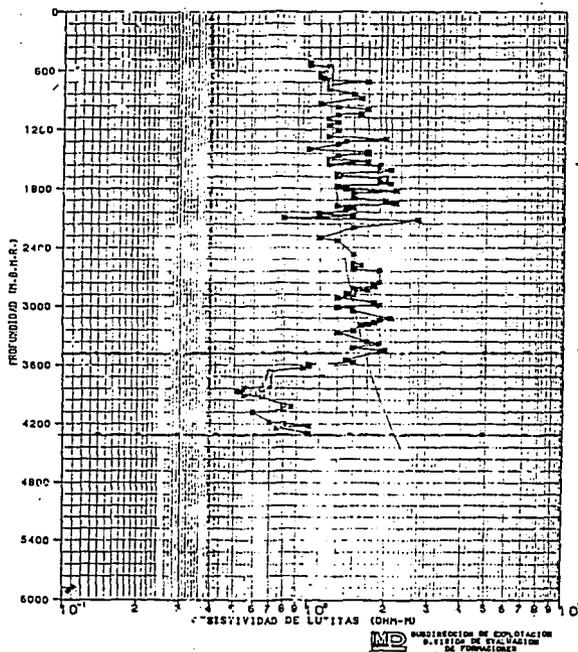


FIGURA 5.6 VARIACION DEL TIEMPO DE TRANSITO DE LAS LUTITAS CON LA PROFUNDIDAD EN EL POZO KI-101

Como podemos observar en la grafica hay un incremento en el tiempo de transito a disminucion en la velocidad lo que implica que hay una zona de alta presion entre los 3480 y los 4320 metros de profundidad

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FIGURA 5.7 VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE LAS LUITAS CON LA PROFUNDIDAD DEL POZO KJ-101**

*Como podemos observar en esta grafica hay una disminucion de la resistividad lo que implica que hay una zona de alta presion entre los 3480 y 4320 metros de profundidad*

## CAPITULO VI.- CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente tesis se enfocó primordialmente para ver la utilidad del hecho de conocer las velocidades sísmicas a partir de registros de pozos y perfiles sísmicos multicanal para la determinación de zonas de presiones anormales, donde tenemos que hacer las siguientes observaciones:

Es muy importante considerar la calidad de los datos sísmicos, y la presencia de superficies de interfase como reflectores con gran contraste de impedancia acústica lo cual repercute en la buena interpretación que se realice con el VELAN para la obtención de mejores resultados.

Así mismo, debemos de preocuparnos por realizar aun más estudios de sísmica en nuestro país para que los coeficientes y constantes elásticos ó tendencia normal de compactación que utilizemos sean lo más apegado a nuestro ambiente geológico y así, discriminar, en su caso, las zonas del subsuelo con presiones anormales.

Apoyarnos en los estudios de registros geofísicos de pozos, principalmente en el registro sísmico de porosidad que dan gran validez al análisis continuo de velocidad VELAN.

El estudio de aplicación a pesar de que fue desarrollado en 1986 en el Instituto Mexicano del Petróleo por el Ingeniero Marco Antonio Flores Flores y un servidor, en la actualidad esta técnica se sigue empleando, y cada día tiene mayor aceptación para disminuir los problemas que se puedan presentar si no se considera una zona de presión anormal como son, riesgos ambientales, ahorro en el costo de los pozos exploratorios y de desarrollo; y lo que es de gran importancia como se había comentado desde la introducción de nuestro trabajo, el evitar o disminuir el riesgo de la pérdida de vidas humanas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

También debemos de considerar que los resultados dependerán de la calidad de los datos sísmicos y la experiencia de los intérpretes. En el presente esta metodología se realiza en forma automatizada por la mayoría de las compañías de procesamiento.

Con el trabajo de tesis y los esfuerzos realizados en el IMP desde 1986 se comprobó la técnica como lo podemos observar en el caso real, pero pienso que para obtener mejores resultados sería necesaria la integración de un equipo multidisciplinario para apoyar y complementar.

Cabe hacer la observación de que también este trabajo, da la pauta para realizar estudios para determinar con mayor precisión los módulos elásticos que se emplean para la determinación de los gradientes de fractura en las nuevas técnicas como sísmica de cizalla.

Podemos recomendar que se emplee esta técnica no solamente en un punto sino en toda la sección sísmica como se plantea en esta tesis, para poder disminuir los problemas en los pozos de desarrollo.

Por lo tanto, la aportación o contribución de este trabajo, como se puede observar, es que los estudios de sísmica de reflexión se aplican normalmente en un solo punto de interés y así obtener un registro de Análisis de Velocidad, VELAN, en el desarrollo de la tesis se aplicó como innovación el método en varios puntos a lo largo de toda la sección sísmica, lo que implica mayor cantidad de evaluaciones de VELAN en una misma zona de estudio, lo cual permite tener una mejor información o un estudio más completo de la zona de interés y de esta manera aproximarnos más a la realidad geológica para la determinación de zonas geopresurizadas.

Así mismo, podemos considerar al método VELAN muy valioso para la determinación de zonas de presiones anormales utilizando únicamente la sísmica de reflexión como un estudio previo y necesario aunque no se tenga información de pozos. Así mismo para la determinación de presiones predictivas de la fractura de rocas del subsuelo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## BIBLIOGRAFIA

HOTTMAN, C.E. and JOHNSON, R.K. "Estimation of Formation Pressure from Log-Derived Shale Properties" Journal of Petroleum Technology, June, 1965.

PENNEBAKER, E.S. "An Engineering Interpretation of Seismic Data". AIME, SPE. 2165. October, 1968.

EATON, B.A. "The Effect of Overburden Stress on Geopressure Prediction from Wells Logs" Journal of Petroleum Technology, August, 1972.

EATON, B.A. "The equation for Geopressure Predictions from Wells Logs" SPE. 50<sup>th</sup> AIME, Fall Meeting, Dallas Texas. Sep-Oct., 1975.

GARDNER, L.W. "Vertical Velocities from reflection shooting" Geophysics, Vol 12, pp 221-228, 1947.

GARDNER, G.H.F., and GARDNER L.W. "Formation Velocity and Density: The Diagnostic Basis for Stratigraphic Traps" Geophysics, Vol. 39, December, 1974.

YAÑEZ, M. M., "Planeación de la Perforación de Pozos Exploratorios a partir de la información Sísmica", Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, 1983.

MATTHEUS, W.R. and KELLY, J. "How to Predict Formation Pressure and Fracture Gradient from Electric and Sonic Logs", Oil and Gas Journal, February, 20, 1967.

FAUST L.Y. "An Interpretative Approach to Seismic Velocities" GeoQuest International Ltd., June 1, 1975.

HUBBERT, M.K. and WILLIS D.G. "Mechanics of Hydraulic Fracturing" Trans., AIME, 1957.

HUBBERT, M.K. and RUBEY, W. W. "Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting", Geol. Soc. of Amer. Bull., February, 1959.

TAYLOR, D.B. Y SMITH T.K. "Improving Fracture Gradient Estimates in Offshore Drilling", Oil and Gas Journal, April, 1967.

DIX, C.H. "Seismic Velocities from Surface Measurements" Geophysics, Vol. 20 No. 1, January, 1955.

FAUST L.Y. "Seismic Velocity as a Function of Depth and Geologic Time" Geophysics, Vol. XX, 1955.

BELLOTI, P., and GIACCA, D. "Pressure Evaluation Improves Drilling Programs". Oil and Gas Journal, September, 1978.

DOBRIN, M.B. "Introduction to Geophysical Prospecting" Mc. Graw- Hill Book Company, Inc., printed in USA, 1976.

TANER, M. T. and KOEHLER, G., "Velocity Spectra Digital Computer Derivation and Application of Velocity Functions". Geophysics, Vol. 34, December, 1969.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN