

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

“Rediseño y calibración de un instrumento de laboratorio para  
medir porosidad usando helio”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN PETRÓLEO**

Presentada por:

Christian Fernando Ramón Saraguro

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

## AGRADECIMIENTO

A mi padre el Ing. Segundo A. Ramón Ramírez, a mi madre la Sra. Fanny Victoria Saraguro Eras, mi tío el Dr. Homero Saraguro Eras, mis hermanos Karem y Bruno, mis sobrinos Leonardo y Rafael, mi Director de Tesis el Ing. Ricardo Gallegos Orta, Ing. Luís Amores, Ing. Segundo Mariño, Ing. Olga Guerrero, Sr. Iván Guzmán que me guiaron e hicieron posible el desarrollo y culminación del presente tema de Tesis.

## DEDICATORIA

A mi familia que me brindó la educación sin considerar el costo, para proyectar mi porvenir, pero principalmente me brindó su amor y dedicación para consolidarlo.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Ricardo Gallegos Orta  
DECANO DE LA FICT  
PRESIDENTE  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mario González Zambrano  
MIEMBRO PRINCIPAL

---

Ing. Héctor Román Franco  
MIEMBRO PRINCIPAL

## DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Christian Fernando Ramón Saraguro

## RESUMEN

El presente trabajo describe el Rediseño y calibración de un instrumento de laboratorio para medir porosidad usando helio, medición que se realiza sobre núcleos muestra (plug) extraídos de estratos de las zonas de interés de pozos de yacimientos petroleros. Instrumento cuya medición la realiza por medio de la expansión de un gas, el cual ha sido implementado en el laboratorio de yacimientos y petrofísica. Su descripción contiene, conceptos básicos, métodos, equipo, obtención y análisis de resultados, además de un programa de procesamiento de datos computarizado para el cálculo de resultados. La revisión de conceptos básicos, será primordial para tener una mayor comprensión durante el desarrollo de la prueba y análisis de resultados. Se realiza el rediseño y calibración del instrumento para las expansiones del gas, calibración de medidores digitales de presión, adecuación del sistema de regulación de presión, conexiones de ingreso de aire y gas.

Se realizan cálculos, por medio de la ecuación de los gases ideales (presión, volumen, temperatura) en base al principio de la Ley de Boyle. Obteniendo la calibración de un volumen de referencia, utilizado para la calibración del equipo, y realizar las correspondientes expansiones.

Los resultados obtenidos han sido corroborados por medio de instrumentos de medición de porosidad, pertenecientes a laboratorios de Petroproduccion en los que se utiliza el mismo principio para su medición.

Se describe el funcionamiento, el ingreso de datos y obtención de resultados por medio del programa de procesamiento de datos.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>1. CONCEPTOS BÁSICOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Porosidad.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Porosidad efectiva.....	18
1.1.2 Porosidad absoluta.....	20
1.1.3 Porosidad Primaria.....	21
1.1.4 Porosidad Secundaria.....	22
<b>1.2 Factores que afectan la porosidad.....</b>	<b>25</b>
1.2.1 Porosidad de las areniscas.....	25
1.2.1.1 Consolidación.....	27
1.2.1.2 Cementación.....	32



1.2.1.3	Cemento de sílice.....	32
1.2.1.4	Cemento de Carbonato.....	33
1.2.1.5	Cemento de Arcilla.....	34
1.2.2	Porosidad de las Calizas.....	36
1.2.21	Diaclasas.....	38
1.2.22	Acción de Lixiviación por aguas subterráneas.....	40
1.2.23	Dolomitización.....	40
1.3	Ley de Boyle.....	45
1.4	Usos de la porosidad.....	51

## **CAPITULO 2**

<b>2. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA POROSIDAD.....</b>	<b>54</b>
2.1 Registros eléctricos.....	55
2.2 Porosímetro de Boyle.....	85
2.3 Porosímetro de Ruska.....	89
2.4 Método de expansión del gas contenido en los poros.....	91
2.5 Método de inyección de mercurio.....	96
2.6 Método de pérdida de peso.....	100
2.7 Método de saturación de la muestra en un líquido.....	101
2.8 Método aditivo de saturaciones de fluidos.....	104

### **CAPITULO 3**

<b>3. DESCRIPCIÓN DEL POROSIMETRO.....</b>	<b>107</b>
<b>3.1</b> Indicador digital de Presión.....	107
<b>3.2</b> Transductor de Presión.....	119
<b>3.3</b> Pesos calibrados .....	128
<b>3.4</b> Calibración del Equipo.....	131
<b>3.5</b> Diagrama de funciones de porosímetro.....	149
<b>3.6</b> Procedimiento para la determinación de la porosidad.....	150

### **CAPITULO 4**

<b>4. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>155</b>
<b>4.1</b> Preparación de la muestra.....	156
<b>4.2</b> Determinación de volumen de la roca.....	160
<b>4.3</b> Determinación del volumen poroso.....	165
<b>4.4</b> Procesamiento de datos (Programa) .....	166
<b>4.5</b> Análisis de los resultados.....	170
<b>4.6</b> Comparación de resultado obtenido mediante otro método.....	177

**CAPITULO 5**

**5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....186**

**BIBLIOGRAFÍA**

**FOTOS**

**APÉNDICE**

## ABREVIATURAS

atm	Atmósferas
Bbl	Barril
cc	Centímetros cúbicos
cm	Centímetro
CW	Clockwise (sentido de las manecillas del reloj)
CCW	Counterclockwise (en contra del sentido de las manecillas del reloj)
eV	Electrón voltio
gal	Galón
°C	Grados centígrados
°F	Grados fahrenheit
gr/cc	Gramo por centímetro cúbico
Hz	Hertz
Kgf /cm <sup>2</sup>	Kilogramos fuerza por centímetro cuadrado
l	Litro
lpc	Libras por pulgadas cuadradas absolutas
lb/gal	Libra por galón
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
m/hr	Metro por hora
mA	Miliampere
µseg / ft	Microsegundo por pie
mm	Milímetro
md	Milidarcy
mi	Milla
mi <sup>2</sup>	Milla cuadrada
ml	Mililitros
µf	Microfaraday
ohm-m	Ohmio por metro
ft	Pies
ft/seg	Pie por segundo
Psi	Pounds per square inch
Psig	Pounds per square inch gauge
in	Pulgada
seg	Segundos
Watt	Vatio

Vac Voltios de corriente alterna  
Vdc Voltios de corriente continúa

## SIMBOLOGÍA

$\theta$	Angulo
Am-Be	Americio 246 - Berilio
k	Constante
C $\Delta t_{sh}$	Constante obtenida comparando $\Phi_s$ calculada por la formula de Wyllie con el verdadero valor de porosidad.
C <sub>p</sub>	Compactación de la arcilla.
d	Diámetro
$\rho$	Densidad
$\rho_a$	Densidad de la anhidrita.
$\rho_g$	Densidad del grano de arena
$\rho_b$	Densidad neta corregida, dada por el registro.
$\rho_f$	Densidad de los fluidos de la formación
$\rho_{gav}$	Densidad promedia de los granos de la matriz.
$\rho_d$	Densidad de la dolomita.
$\rho_y$	Densidad del yeso
LED	Diodos emisores de luz
DSN	Dual-Spacing Neutrón
Ec.	Ecuación
L	Espesor
FVF	Factor volumétrico de formación
R	Factor de recobro
V' <sub>sh</sub>	Fracción de volumen de arcillas laminares y estructurales, no arcillas dispersas
F	Fuerza
D, A, G, Y	Fracciones en la matriz de cada mineral, ya sea Dolomita, Anhidrita, Gibsonita, Yeso etc.
He	Helio
DPI	Indicador digital de presión
R <sub>c</sub> , R <sub>H</sub>	Lecturas del pistón micrométrico, cuando la copa contiene la muestra y otra cuando no la tiene, respectivamente.
Saran	Material termoplástico
n <sub>1</sub> , n <sub>2</sub>	Moles de gas en la celda1 a condición I.

$n_3, n_4$	Moles de gas en la celda2 a condición II.
$W_1$	Peso de muestra 1
$W_2$	Peso muestra 2
$W_{msat}$	Peso de muestra saturada
$W_{mdry}$	Peso de muestra seca
$\Phi$	Porosidad verdadera
$\Phi_s$	Porosidad calculada por registro sónico
$\Phi_{sdis}$	Porosidad calculada por registro sónico para arcillas dispersas.
$\Phi_{sh}$	Porosidad de arcillas adyacentes
$\Phi_{ssh}$	Porosidad del registro sónico, en arcillas, esta entre 0.2 y 0.4, y tan bajas como 0.1 en carbonatos arcillosos.
$\Phi_e$	Porosidad efectiva de la formación arcillosa
$\Phi_{eff}$	Porosidad efectiva
$\Phi_{ig}$	Porosidad intergranular
$\Phi_{im}$	Porosidad intermatriz
$\Phi_{neff}$	Porosidad no-efectiva
$(\Phi_s)_{cc}$	Porosidad registro sónico corregido por compactación,
$P$	Presión
$P_a$	Presión atmosférica
FDC	Registro de Densidad Compensado
Dolostone	Roca compuesta por dolomita.
$S$	Saturación
$S_g$	Saturación de gas libre
$S_o$	Saturación de petróleo
$S_w$	Saturación de agua
$S_{gxo}$	Saturación del gas en la zona lavada.
SNP	Sidewall Neutrón Porosity
$t$	Tiempo gastado por la onda para recorrer determinada distancia, es inversamente proporcional a la velocidad de las ondas acústicas en cada tipo de formación ( $\mu\text{seg}/\text{ft}.$ )
$\Delta t$	Tiempo leído del registro sónico en ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_{sh}$	Tiempo leído del registro sónico para arcillas dispersas.
$\Delta t_w$	Tiempo leído del registro sónico para el agua.
$\Delta t_{sh}$	Tiempo de transito en arcillas adyacentes
$\Delta t_{ma}$	Tiempo de tránsito en el material de la matriz ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_{ma(ave)}$	Tiempo de transito en el material de la matriz promedio ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_{ma(dol)}$	Tiempo de transito en el material de la matriz dolomita ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_{ma(anh)}$	Tiempo de transito en el material de la matriz anhídrita ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_{ma(gyp)}$	Tiempo de transito en el material de la matriz yeso ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$\Delta t_f$	Tiempo de tránsito en el fluido ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$T$	Temperatura
$A, B$	Valores determinados empíricamente ( $\mu\text{seg} / \text{ft}.$ )
$v$	Velocidad de las ondas acústicas, pies /seg
$V$	Volumen

$V_1, V_2$	Volumen de las celdas (1) y (2)
$V_{dis}$	Volumen de arcillas dispersas.
$V_a$	Volumen conexión entre disco de acero.
$V_{am}$	Volumen conexión entre muestra y disco de acero.
$V_{ch}$	Volumen de conexión hidrostático
$V_d$	Volumen de discos no utilizados en la prueba.
$V_{esfera}$	Volumen de cada esfera
$V_f$	Volumen de fluidos
$V_g$	Volumen del grano de núcleo de muestra (plug)
$V_{lp}$	Volumen de lectura del porosímetro
$V_{ig}$	Volumen intergranular
$V_{im}$	Volumen intermatriz
$V_{ma}$	Volumen matriz
$V_b$	Volumen neto (bulk)
$V_r$	Volumen neto (bulk) del reservorio
$V'_{sh}$	Incluye la fracción de volumen de arcillas laminares y estructurales, pero no para arcillas dispersas
$V_{sh}$	Volumen de arcillas.
$V_{shd}$	Volumen de arcillas dispersas
$V_p$	Volumen del poro
$V_{pe}$	Volumen del poro interconectado
$V_{pne}$	Volumen del poro no interconectado
$V_s$	Volumen de sólidos



## INDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.1A	Empaquetamiento cúbico.....	8
Figura 1.1B	Empaquetamiento hexagonal.....	8
Figura 1.1C	Empaquetamiento romboédrico.....	8
Figura 1.1D	Variación de la porosidad con la simetría de distribución de tamaño del grano (Tickell).....	12
Figura 1.2	Tipos de volumen de roca clástica.....	15
Figura 1.2.1	Efecto de la compactación natural sobre la porosidad.....	29
Figura 1.2.2	Compresibilidad efectiva de la roca reservorio.....	31
Figura 1.3A, B y C	Esquema de la ley de boyle.....	47
Figura 1.3D y E	Esquema de la ley de boyle.....	48
Figura 1.3.1	Diagrama en función de la ley de boyle.....	50
Figura 2.1.2	Equipos de registro de pozos petrolíferos.....	72
Figura2.2A	Operación de dos celdas por el porosímetro de boyle a condición 1.....	86
Figura2.2B	Operación de dos celdas por el porosímetro de boyle a condición 2.....	86
Figura 2.3.1A	Dibujo esquemático del porosímetro Ruska.....	89
Figura 2.3.1B	Foto de un porosímetro de Ruska.....	89
Figura 2.4	Diagrama esquemático del porosímetro de Washburn-Bunting.....	94
Figura 2.5	Porosímetro de Ruska de alta presión.....	96
Figura 2.7.1	Aparato de saturación para determinar volumen del poro.....	101
Figura 3.1.1	Vista desde arriba de conexión del indicador digital de presión con el transductor.....	110
Figura 3.1.2	Vista desde arriba del indicado digital de presión con la cubierta removida.....	111
Figura 3.1.3	Diagrama del conector transductor con el indicador digital de presión.....	112
Figura 3.1.4	Vista frontal del indicador de presión digital con la cubierta removida.....	116

Figura 3.1.5	Vista posterior del indicador de presión digital con la cubierta removida.....	116
Figura 3.1.6	Conexión de la instalación eléctrica.....	117
Figura 3.2	Esquema de un transductor.....	119
Figura 3.2.1	Diagrama de ajuste para el transductor con la cubierta removida.....	126
Figura 3.3.1	Discos de calibración de 1in.....	129
Figura 3.3.2	Discos de calibración de 1.5 in.....	129
Figura 3.3.3	Cámara porta núcleo #1.....	130
Figura 3.3.4	Cámara porta núcleo # 2.....	130
Figura 3.5	Diagrama de funciones del porosímetro.....	149
Figura 4.1	Diagrama del extractor Soxhlet para limpieza de núcleos muestra.....	158
Figura 4.2	Picnómetro eléctrico.....	163
Figura 4.5	Esquema del análisis de resultados obtenidos en el Porosímetro del laboratorio de la FICT.....	173
Figura 4.5.1	Resultado del chequeo de la porosidad.....	176
Figura 4.6	Esquema de la comparación entre resultados de porosidad entre el Porosímetro de la FICT y de Petroproducción ....	185

## INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1	Definiciones de y relaciones entre porosidades de la roca y volúmenes.....14
Tabla 2.1.1	Lecturas acústicas en variación de litología.....66
Tabla 2.1.2	Características básicas de la fuente Am-Be.....69
Tabla 2.1.3	Densidad de algunos minerales.....82
Tabla 3.1.1	Despliegue en pantalla dpi.....108
Tabla 3.1.2	Parámetros físicos dpi.....109
Tabla 3.1.3	Precisión (lectura solamente) dpi.....109
Tabla 3.1.4	Eléctrico dpi.....109
Tabla 3.1.5	Resultados analógicos dpi.....110
Tabla 3.1.6	Información del conector "transductor - dpi".....112
Tabla 3.1.7	Selección de rango para el indicador digital de presión. .118
Tabla 3.2.1	Conexiones del transductor.....124
Tabla 3.3.1	Características discos 1 in de diámetro.....129
Tabla 3.3.2	Características discos de 1.5 in de diámetro.....129
Tabla 3.3.3	Dimensiones de las cámaras porta núcleo.....130
Tabla 3.4.1	Valores típicos de densidad de los granos.....147
Tabla 4.4	Identificación de la muestra.....166
Tabla 4.4.1	Constantes si muestra es de 1in diámetro.....166
Tabla 4.4.2	Constantes si muestra es de 1.5 in diámetro.....167
Tabla 4.4.3	Determinación del volumen de referencia.....167
Tabla 4.4.4	Determinación del volumen Poroso.....168
Tabla 4.4.5	Determinación de la porosidad Efectiva.....168
Tabla 4.5	Análisis de resultados obtenidos en el Porosímetro del laboratorio de la FICT.....173
Tabla 4.5.1	Característica de muestras usadas por laboratorios importantes para comparación de métodos de expansión de gas y técnicas de saturación para medir porosidad.....175
Tabla 4.6	Datos y resultados obtenidos con el Porosímetro de los Laboratorios de Petroproducción.....182
Tabla 4.7	Datos y resultados obtenidos con el Porosímetro de helio del Laboratorio de la FICT.....183

Tabla 4.8	Comparación de resultados de Porosidad entre el Porosímetro de la FICT y de Petroproducción.....	184
-----------	--	-----