ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

# Acondicionamiento, Operación y Calibración del Limpiador de Núcleos con Dióxido de Carbono del Laboratorio de Ingeniería del Petróleo de la ESPOL

C. López [1], R. Gallegos [2]
Laboratorio de Petróleos, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra [1]
Escuela Superior Politécnica del Litoral [1]
celopez@espol.edu.ec [1]
Ingeniero de Petróleo, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra [2]
Escuela Superior Politécnica del Litoral [2]
Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09015863, Guayaquil, Ecuador [1,2]
rgallegos@hotmail.com [2]

## Resumen

*Este trabajo trata sobre la restauración, elaboración de la documentación técnica y determinación del nivel de limpieza del limpiador de núcleos con dióxido de carbono ($CO_2$), cuya utilidad no ha podido ser debidamente aprovechada por falta de información técnica y desconocimiento del procedimiento de operación de éste equipo. Para ello, ha sido necesario el chequeo minucioso del equipo, la recopilación de la información técnica obtenida de los fabricantes de las partes que lo conforman y muchas horas de pruebas de laboratorio, cuyos resultados considerados exitosos señalan un nivel de limpieza promedio del 97.64 %. El limpiador de núcleos con $CO_2$, es capaz de realizar la limpieza simultánea de hasta 50 muestras o núcleos saturados con fluidos originales del yacimiento petrolífero del cual hubieren sido extraídos. El lavado se realiza mezclando dos solventes, tolueno y dióxido de carbono, que a presión y temperatura atmosférica se encuentran en estado líquido y gaseoso respectivamente, para formar una mezcla homogénea de ambos fluidos, éstos son sometidos a una presión tal que el $CO_2$ se condensa y se mezcla con el tolueno dentro de una cámara de alta presión en la que previo a la presurización se colocan los núcleos a ser lavados.*

**Palabras Claves:** *Limpiador de núcleos con dióxido de carbono, mezcla del tolueno y dióxido de carbono.*

## Abstract

*This work treat about the restoration, elaboration of technical documentation and determination of clean level of cores carbon dioxide solvent flush equipment, whose usefulness cannot been duly profited due to lack technical information and its corresponding equipment operation procedure. To develop this work have been necessary a detailed review of equipment, the compilation of parts technical information gotten from the manufactures and many hours of laboratory test, whose results considered successful have been established in an average level of 97.64 %. The cores carbon dioxide solvent flush equipment is able to do a simultaneous cleaning of 50 samples saturated with original fluids brought from the petroleum reservoir where they were recovered. The cleaning is carry out mixing two solvents, toluene and carbon dioxide, which at atmospheric temperature and pressure are liquid and gas respectively, to make an homogeneous mixing both fluids are pressurized at a level that carbon dioxide condenses and mixes with toluene inside a high pressure vessel where the samples are laid before pressurization.*

**Keywords:** *Carbon dioxide solvent flush equipment, toluene and carbon dioxide mixing.*

# 1. Introducción

La posibilidad de realizar el lavado de núcleos de manera simultánea y en importantes cantidades mediante el uso de un equipo denominado “Limpiador de Núcleos con Dióxido de Carbono”, puso en evidencia la inexistencia de la información técnica relacionada con este equipo en los archivos del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL. Las dificultades de conseguir dicha información técnica debido a que se trata de un equipo ensamblado bajo pedido en 1988, dieron origen a la realización de un trabajo enfocado en la rehabilitación, operación y calibración del citado equipo.

La importancia de obtener núcleos (muestras o plugs) limpios, es que a partir de éstos se realizan muchos análisis petrofísicos cuyos resultados son aplicados en análisis de reservorio, por lo tanto, una óptima limpieza de muestras en importantes cantidades y en el menor tiempo posible, facilitará la obtención de parámetros petrofisicos confiables, que a su vez permitirán realizar análisis de reservorios reales en el corto plazo.

Por otro lado, las características que deben tener los núcleos a ser lavados deben ser muy bien entendidas, dado que éstas permitirán realizar el análisis correspondiente para determinar el nivel de limpieza que puede lograrse utilizando este método.

Debido a que el dióxido de carbono es uno de los agentes de limpieza, se debe analizar el cambio que éste sufre a medida que la presión aumenta, para ello el comportamiento de los gases y sus leyes juegan un papel importante.

La puesta en funcionamiento de este equipo y su correspondiente documentación técnica han requerido de una plena identificación de cada una de sus partes, así como también de sus características y limitaciones.

Los ensayos realizados en el laboratorio utilizando el limpiador de núcleos con $CO_2$, han permitido la elaboración detallada de un procedimiento de operación que garantiza el manejo seguro y apropiado del equipo a altas presiones.

Finalmente, gracias a la colaboración y donación de núcleos por parte del Laboratorio de Investigaciones Geológicas Quito de Petroproducción, fue posible la realización de la limpieza de núcleos saturados con fluidos originales del yacimiento petrolífero del cual fueron extraídos, lo que permitió enmarcar en un contexto real el nivel de limpieza que puede lograrse utilizando el limpiador de núcleos con dióxido de carbono de la ESPOL.

# 2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general, la puesta en funcionamiento y elaboración de la documentación técnica correspondiente al limpiador de núcleos con dióxido de carbono del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL.

El objetivo secundario, es el de determinar el porcentaje de limpieza del petróleo en presencia de agua lavando núcleos saturados con ambos fluidos mediante el limpiador de núcleos con $CO_2$.

Los objetivos específicos de éste trabajo son:

- Proporcionar un método alternativo de limpieza de núcleos.
- Aportar con la funcionalidad del limpiador de núcleos con $CO_2$ para su uso en pruebas de laboratorio.
- Mejorar la preparación de los estudiantes de ingeniería del petróleo en lo concerniente al manejo de este equipo.
- Preparar al estudiante en la observación e interpretación de resultados.

# 3. Conceptos fundamentales

## 3.1 Limpieza del núcleo y su importancia

La importancia de tener núcleos limpios radica en el hecho de que sobre estos se realizan análisis petrofisicos tales como [1]:

- Determinación de la porosidad efectiva
- Determinación de la densidad de la muestra
- Determinación de la permeabilidad absoluta
- Pruebas de desplazamiento
- Cálculo de presiones capilares
- Cálculo de permeabilidades relativas
- Pruebas de compresibilidad y resistencia de la roca
- Pruebas de mojabilidad y movilidad de fluidos
- Propiedades acústicas de la roca
- Propiedades eléctricas de la roca

Para garantizar la autenticidad de éstos parámetros es necesario realizar previamente una limpieza integra de las muestras de tal manera que no queden residuos de los fluidos originales, por lo tanto la aplicación de técnicas apropiadas de limpieza es el factor que le agrega utilidad al uso del limpiador de núcleos con $CO_2$.

## 3.2 Porosidad, permeabilidad y saturación como características fundamentales de los núcleos a ser lavados

Los núcleos son muestras de roca extraídas de los reservorios petrolíferos que deben tener tres características principales tanto para el proceso de limpieza como para el posterior análisis petrofisico, estas son: Porosidad, permeabilidad y saturación de petróleo. La porosidad es la capacidad de la roca a almacenar fluidos en sus espacios intergranulares, cuando estos poros están interconectados permiten que los fluidos almacenados en la roca migren, a esto se conoce como permeabilidad de la roca a los fluidos, mientras que la saturación de un fluido en una roca porosa y permeable es el porcentaje del espacio poroso de la roca ocupado por un fluido [2]. La figura 1 muestra una representación de los espacios intergranulares de la roca en la que los poros interconectados almacenan el fluido y contribuyen a la migración de éstos [3].

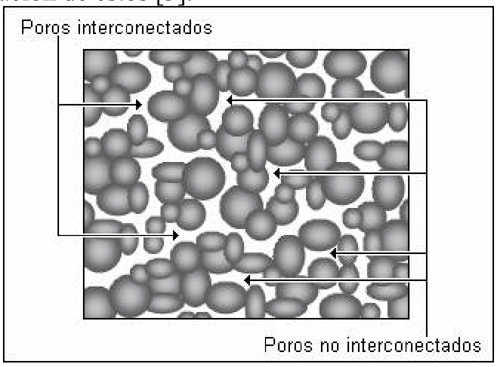


**Figura 1.** Representación de la porosidad en una roca reservorio.

### 3.3 Importancia del $CO_2$ en el proceso de lavado de núcleos

El dióxido de carbono en estado líquido se disuelve con facilidad en fluidos con moléculas no polares como hidrocarburos con menos de 20 átomos de carbono y otras moléculas orgánicas como aldehídos, éteres y acetonas [4]. El $CO_2$ contribuye a la disminución de la viscosidad de los crudos pesados, sin embargo, mediante el empleo de un solvente, se puede aumentar la solubilidad de muchas sustancias en el $CO_2$. Este hecho respalda el uso del $CO_2$ como un importante agente de limpieza mezclado con tolueno.

El $CO_2$ es un gas que tiene los tres estados de la materia, sólido, líquido y gas. Este gas también tiene un punto triple, es decir que bajo las condiciones apropiadas pueden coexistir los tres estados de la materia al mismo tiempo [5]. El diagrama de fases del $CO_2$ de la figura 2 denota algunos parámetros de interés.

La presión de condensación del $CO_2$ a la temperatura del laboratorio de petróleos que oscila en 27 ºC está entre 956.8 y 1058.4 psi, esto justifica la necesidad de alcanzar presiones superiores a 1000 psi para mantener al $CO_2$ en estado líquido durante la limpieza de los núcleos.

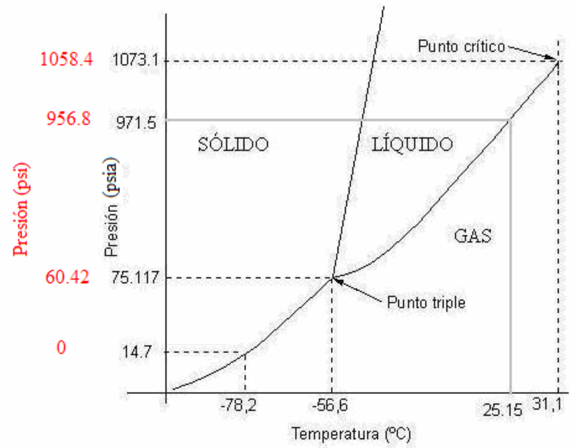


**Figura 2.** Diagrama de fases del $CO_2$.

## 4. Características del equipo

### 4.1 Especificaciones técnicas del equipo y sus partes

La figura 3 muestra el equipo con sus partes y accesorios debidamente identificados.

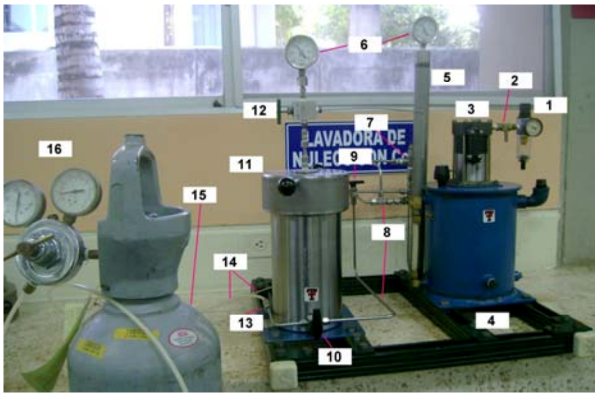


**Figura 3.** Partes que conforman el limpiador de núcleos con $CO_2$.

1. Regulador de presión neumática con filtro
2. Válvula de paso del aire
3. Bomba hidráulica
4. Tanque de depósito del tolueno
5. Pulsation dampener
6. Medidores de presión
7. Válvula de recirculación
8. Líneas de flujo hidráulicas
9. Válvulas de tres vías de líneas de flujo
10. Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
11. Cámara de alta presión
12. Válvula de alivio
13. Válvula check (ingreso del $CO_2$)
14. Líneas de flujo de gases ($CO_2$ y aire)
15. Bombona de $CO_2$
16. Regulador de presión del tanque de $CO_2$

**4.1.1 Cámara de alta presión.** Es un compartimiento cilíndrico de acero inoxidable con un orificio de drenaje en su parte inferior lateral, consta de una tapa roscable del mismo material sobre la que se encuentra una válvula de alivio y un medidor de presión. Este compartimiento tiene una presión máxima de trabajo de 2500 psi, el acero que conforma el cuerpo del cilindro tiene un espesor de aproximadamente 0.917 cm, la tapa tiene un espesor de 1.73 cm, dentro de la tapa se encuentra alojado un disco de acero de 12.5 cm de diámetro que sella la salida de fluido por los bordes del cilindro de la cámara, la capacidad volumétrica de la cámara es de 3.60 litros (0.95 galones). La cámara de alta presión es donde las muestras a ser lavadas se depositan envueltas en una malla de nylon que evita que las muestras golpeen las paredes del cilindro durante el proceso de lavado, además la maya facilita su extracción puesto que se trata de un paquete compacto, la presión a la que se deben someter las muestras en la cámara durante el tiempo de remojo debe ser de 1050 psi como mínimo y 1200 psi como máximo.

**4.1.2 Bomba de alta presión.** La bomba hidráulica de acción neumática tiene un ensamblaje sencillo y esta dividida en dos secciones, la sección neumática y la sección hidráulica tal como se muestra en el esquema de la figura 4. Básicamente, una bomba hidráulica de acción neumática tiene un pistón en su interior, el cuál en un extremo es empujado por una presión de aire dada, mientras en el otro extremo, el pistón empuja el líquido a ser desplazado, el área del pistón de la sección de aire es considerablemente mayor al área de la sección hidráulica, esto permite que a bajas presiones neumáticas se alcancen altas presiones hidráulicas. El aire y el líquido no entran en contacto.

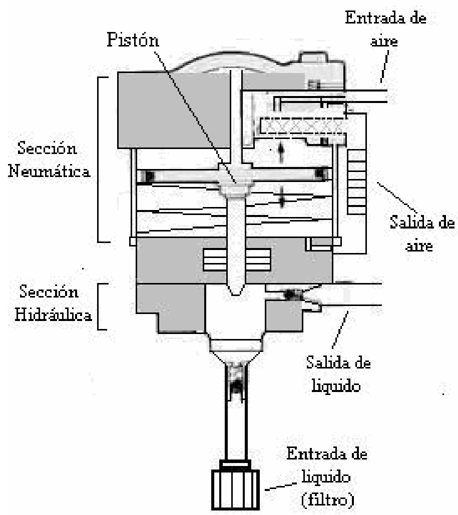


**Figura 4.** Esquema interno de la bomba hidráulica

La bomba requiere de una presión neumática máxima de entrada de 125 psi y proporciona una presión de salida hidráulica máxima de 4500 psi [6].

**4.1.3 Medidores de presión, válvulas y accesorios.** Todas las presiones registradas en este equipo son reportadas en base al sistema ingles de medidas, en este caso, libras por pulgadas cuadradas (Pounds per Square Inches, PSI). Este quipo utiliza dos medidores de presión, uno colocado sobre la cámara de alta presión y otro sobre el pulsation dampener, cada uno con un rango de medida que va de 0 a 3000 psi. La figura 5 muestra uno de los medidores de presión del limpiador de núcleos con $CO_2$ marcando 1200 psi durante el proceso de limpieza.


**Figura 5.** Medidor de presión a 1200 psi

Existen cuatro válvulas de alta presión en este equipo, una válvula de una vía y tres válvulas de tres vías.
La válvula de una vía permite el flujo de un punto a otro en ángulo recto, está hecha de acero inoxidable con una presión de trabajo de hasta 3000 psi, sus puertos de entrada y salida son de 1/4” de diámetro interno. Cumple con la función de controlar el flujo a través de la línea de recirculación, la línea de recirculación permite que el tolueno pueda salir desde el tanque a través de la bomba, inundar las líneas de flujo y retornar al tanque de depósito del tolueno. La figura 6 muestra el mecanismo de recirculación que utiliza el limpiador de núcleos con $CO_2$.


**Figura 6.** Línea y válvula de recirculación

Las válvulas de tres vías del costado inferior de la cámara de alta presión y de las líneas de flujo hidráulicas están hechas por el mismo fabricante, siendo distinto el caso de la válvula de tres vías de la tapa de la cámara. Estas válvulas tienen distintas opciones de flujo.

La figura 7 muestra las opciones de flujo de las válvulas del lado inferior de la cámara y de las líneas de flujo hidráulicas, cuyas presiones de trabajo son de hasta 3000 psi con puertos de 1/4 de pulgada de diámetro interno [7]. Estas válvulas no permiten el libre flujo entre los puertos 2 y 3 tal como se muestra en la figura 7.

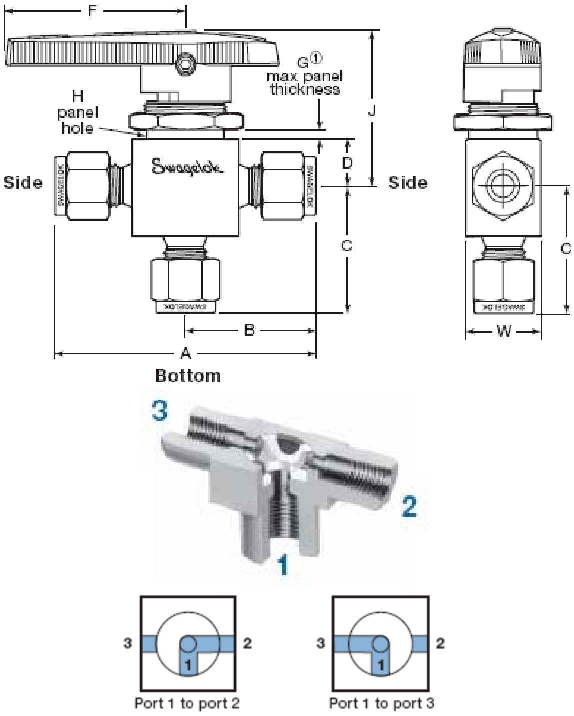


**Figura 7.** Válvula de tres vías y posiciones de flujo

La válvula de tres vías colocada en la tapa de la cámara cumple con el papel de válvula de alivio manual, tiene una presión de trabajo máxima de 10000 psi y sus puertos son de 1/4 de pulgada de diámetro interno, permite el libre flujo entre los puertos F y G mientras controla el flujo en E. La figura 8 muestra la configuración interna de la válvula de alivio [8].

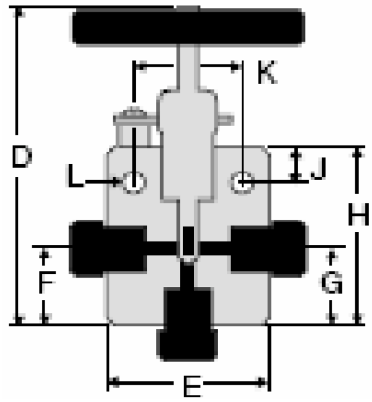


**Figura 8.** Configuración interna de la válvula de alivio

Entre los accesorios utilizados en el limpiador de núcleos con $CO_2$ están: Regulador neumático con filtro, pulsation dampener y válvula check.

Los reguladores juegan un rol importante en la preparación del aire para sistemas neumáticos. Este componente regula el flujo del aire que ingresa a un sistema neumático, atenúa fluctuaciones que pueden ocurrir en el sistema debido al flujo del aire y provee de niveles consistentes de presión. Un regulador de aire proporciona una presión de aire constante al nivel de presión deseado, aunque la presión de entrada de aire al regulador sea mucho mayor. Este componente es utilizado para proveer de una adecuada alimentación neumática a la bomba hidráulica. Este regulador trabaja con una presión máxima de entrada de 150 psi [9]. La figura 9 muestra el regulador conectado a una fuente de aire comprimido.

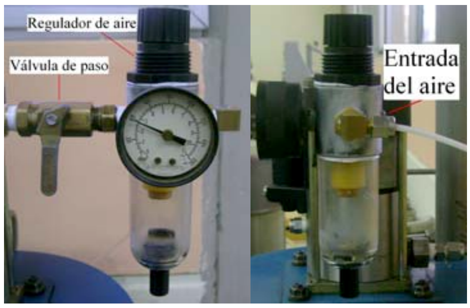


**Figura 9.** Regulador conectado a una fuente de aire.

Un pulsation dampener, es un dispositivo eliminador de pulsaciones. Las bombas de desplazamiento positivo como la utilizada en este sistema de lavado de núcleos dificultan mantener la presión en un nivel constante, más bien por el contrario, crean pulsaciones o choques hidráulicos debido a los golpes que estas generan en cada desplazamiento lo cual representa potencialmente un daño al sistema hidráulico y principalmente a los medidores de presión [10]. El pulsation dampener de este equipo tiene una presión máxima de trabajo de hasta 6000 psi. La figura 3 muestra este dispositivo y su ubicación en el equipo.

La válvula check de acero inoxidable de la línea de carga de $CO_2$, es utilizada como un accesorio de seguridad que impide que haya contraflujo durante la carga del $CO_2$, además, evita que haya una salida descontrolada de tolueno cuando la cámara se encuentra presurizada por encima de 1000 psi y la válvula de tres vías haya sido direccionada de manera accidental hacia la línea de drenaje. La válvula check utilizada en este equipo es capaz de soportar una presión de trabajo de hasta 6000 psi en contraflujo y tiene 1/8 de pulgada de diámetro interno [11]. La figura 10 muestra la válvula utilizada en el limpiador de núcleos con dióxido de carbono.

**Figura 10.** Válvula check de 1/8” de diámetro interno

## 5. Metodología del proceso de limpieza de núcleos, pruebas de laboratorio y resultados obtenidos

La metodología del proceso de limpieza de núcleos que a continuación se describe, requiere de un apropiado entendimiento para aprovechar al máximo las capacidades de este equipo.

Se seleccionan los núcleos a ser lavados que están saturados con petróleo, se procede a envolverlos en una maya de nylon, ésta maya evita que las muestras choquen entre si durante el llenado de la cámara con tolueno, la maya mantiene al paquete compacto y levemente ajustado al cuerpo cilíndrico de la cámara. Una vez colocados los núcleos dentro de la cámara, ésta es fuertemente cerrada, se presurizan los núcleos con dióxido de carbono desde la bombona de gas a una presión regulada de entre 100 a 200 psi, posteriormente se incrementa la presión dentro de la cámara bombeando tolueno hasta alcanzar una presión que se encuentre entre 1050 y 1200 psi, así se formará una mezcla de una sola fase a medida que el $CO_2$ se condensa y disuelve en el tolueno, se remojan las muestras en la mezcla al rango de presión indicado anteriormente durante 24 a 48 horas, se despresuriza la cámara y se drena el solvente, este proceso debe repetirse hasta que el fluido drenado este relativamente limpio [12].

Las pruebas de laboratorio se enfocaron principalmente en la cuantificación del nivel de limpieza, para ello fue necesaria la determinación del porcentaje individual y promedio del petróleo removido utilizando el limpiador de núcleos con $CO_2$ y comparar este porcentaje con el obtenido referencialmente utilizando el equipo de limpieza de núcleos tradicional, el extractor soxhlet. La metodología de limpieza realizada en el CIGQ, consideró primero el lavado en el limpiador de núcleos con $CO_2$ y luego el lavado de los mismos núcleos en el extractor soxhlet, si los núcleos lavados en el limpiador de núcleos con $CO_2$ obtuvieren un alto nivel de limpieza, el extractor soxhlet no sería capaz de recuperar mayor cantidad de petróleo de dichos núcleos.

El Laboratorio de Yacimientos del Centro de Investigaciones Geológicas Quito (CIGQ) de Petroproducción, cedió 4 núcleos saturados con fluidos originales extraídos de un pozo petrolero de la cuenca oriente del Ecuador, con el propósito de enmarcar en un contexto real el proceso de limpieza realizado con el limpiador de núcleos de la ESPOL. El CIGQ también contribuyó con la determinación de los parámetros petrofísicos básicos de los núcleos donados y con la realización de una hoja de cálculo capaz de determinar el nivel de limpieza de los núcleos. Los cálculos realizados fueron elaborados con la asesoría de los ingenieros del CIGQ cuya predisposición y colaboración resultaron muy importantes en la obtención de resultados confiables.

En la tabla 1 se detallan los parámetros petrofísicos de interés de los núcleos donados.

| Muestra | Prof (ft) | Swi | Vp | Peso muestra seca (gr) | ρwi (gr/cc) | API |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9915-16 | 0,105 | 3,0622 | 39,0855 | 1,0154 | 27,4 |
| 2 | 9916-17 | 0,105 | 3,5613 | 40,4895 | 1,0154 | 27,4 |
| 3 | 9927-28 | 0,105 | 3,8559 | 38,4895 | 1,0154 | 27,4 |
| 4 | 9928-29 | 0,105 | 4,0246 | 38,6947 | 1,0154 | 27,4 |

**Tabla 1.** Datos petrofísicos y características de fluidos contenidos en los núcleos donados

Donde:

Prof. (ft): Profundidad en pies.

Vp: Volumen poroso del núcleo, ($cm^3$)

Swi: Saturación de agua inicial

ρwi: Densidad del agua inicial, ($g/cm^3$)

API: Grados API del petróleo que satura los núcleos

Las ecuaciones utilizadas en los cálculos para determinar el porcentaje del petróleo removido fueron:

Porosidad

$$\Phi = \frac{V_P}{V_T} \qquad (1)$$

Volumen de agua inicial

$$V_{Wi} = S_{Wi} * V_P \qquad (2)$$

Masa de agua inicial

$$m_{Wi} = \rho_{Wi} * V_{Wi} \qquad (3)$$

Masa de petróleo inicial

$$m_{Oi} = m.n.sat. - m_g - m_{Wi} \qquad (4)$$

Volumen de petróleo inicial

$$V_{Oi} = \frac{m_{Oi}}{\rho_O} \qquad (5)$$

$$\rho_O = SG_O * \rho_W \,;\, SGo = \frac{141.5}{131.5 + API}$$

$$\rho_W = 1g/cm^3$$

Saturación de petróleo inicial

$$S_{Oi} = \frac{V_{Oi}}{V_P} \qquad (6)$$

Masa de petróleo residual

$$m._{Or} = m.n.lavados - m_g \qquad (7)$$

Volumen de petróleo residual

$$V_{Or} = \frac{m_{Or}}{\rho_O} \qquad (8)$$

$$\rho_O = SG_O * \rho_W \,;\; SGo = \frac{141.5}{131.5 + API}$$

$$\rho_W = 1g/cm^3$$

Saturación de petróleo residual

$$S_{Or} = \frac{V_{Or}}{V_p} \qquad (9)$$

Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{m_{or}}{m_{oi}}\right) * 100 \qquad (10)$$

Porcentaje de limpieza en base al volumen del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{V_{or}}{V_{oi}}\right) * 100 \qquad (11)$$

Porcentaje de limpieza en base a la saturación del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{S_{or}}{S_{oi}}\right) * 100 \qquad (12)$$

Basándose en los datos de la tabla 1, en las ecuaciones planteadas y en la metodología del procedimiento de lavado para el limpiador de núcleos con $CO_2$, se realizó la limpieza de los núcleos donados por el CIGQ en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL obteniendo los resultados detallados en la tabla 2.

| | | | | | L.N. $CO_2$ | Soxhlet | Porcentaje de Limpieza = (1-(mor/moi))x100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Muestra | Prof (ft) | $\Phi_e$ (%) | $K_{abs}$ (md) | $m_{oi}$ (g) | $m_{or}$ (g) | $m_{or}$ (g) | L.N.$CO_2$ | Soxhlet |
| 1 | 9915-16 | 17.05 | 524.8 | 0.4880 | 0,0145 | 0,0144 | 97,0287946 | 97,0492857 |
| 2 | 9916-17 | 18.83 | 1571.97 | 0.4308 | 0,0105 | 0,0104 | 97,5627017 | 97,5859141 |
| 3 | 9927-28 | 20.76 | 3522.14 | 0.4994 | 0,0105 | 0,0104 | 97,8974581 | 97,9174823 |
| 4 | 9928-29 | 21.33 | 3952.13 | 0.2762 | 0,0053 | 0,0052 | 98,0811647 | 98,1173692 |
| | | | | | | Prom. | 97,6425298 | 97,6675128 |

**Tabla 2.** Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo removido utilizando los equipos de la ESPOL

En las figuras 11 y 12 se muestran los núcleos antes y después del lavado en el limpiador de núcleos con $CO_2$.

**Figura 11.** Núcleos saturados de petróleo antes del proceso de limpieza

**Figura 12.** Núcleos después del proceso de limpieza

Los resultados de limpieza obtenidos con el extractor soxhlet, respaldan el nivel de limpieza que puede lograrse con el limpiador de núcleos con $CO_2$ (tabla 2).

Se ha calculado una diferencia que puede ser despreciable en cuanto a la efectividad de ambos métodos de lavado. Se estima que con cargas de dióxido de carbono mayores a 200 psi, los resultados en cuanto a la limpieza de núcleos pueden mejorar ostensiblemente, esto no significa que trabajar con $CO_2$ como único solvente sea lo más recomendable ya que si éste fuere el caso, al gasificarse el $CO_2$ permitiría la concentración del petróleo y su consecuente aumento de viscosidad dentro de los poros de los núcleos, por esta razón, la mezcla del $CO_2$ con un solvente que permanezca en estado líquido a presión atmosférica contribuye a mantener la baja viscosidad del petróleo cuando la presión en la cámara haya disminuido, permitiendo así que el petróleo fluya con facilidad cuando el efecto de arrastre del $CO_2$ se manifieste. Una mayor cantidad de dióxido de carbono mezclado con tolueno acentuaría el efecto de arrastre mejorando el proceso de limpieza. También se debe tener presente que la mezcla de $CO_2$ con otro solvente, mejora las capacidades de limpieza de este gas en estado líquido para mezclarse con petróleos pesados.

## 6. Conclusiones

El trabajo de rehabilitación del equipo y la elaboración de la documentación técnica correspondiente, han sido logrados exitosamente.

Se obtienen resultados de limpieza de núcleos saturados con fluidos originales con una eficiencia promedio del 97.64 % en los ensayos realizados.

Para obtener un alto nivel de limpieza, el tiempo de remojo de los núcleos en la cámara debe ser de 24 a 48 horas, con presiones que deben estar en un rango de 1050 a 1200 psi.

Con presiones de remojo de hasta 1200 psi no se presentan daños en la geometría o fracturas en los núcleos.

Con presiones de carga del $CO_2$ de 200 psi en la cámara de alta presión, se logran mejores resultados con el limpiador de núcleos del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL.

Desde el punto de vista académico, se justifica plenamente el uso de ambos equipos dependiendo de la cantidad de núcleos que se requieran limpiar.

## 7. Referencias

[1] Forrest F. Craig Jr., Aspectos de Ingeniería de la Inyección de Agua, capítulo 2, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, 1982

[2] B.C.Craft and M.F. Hawkins, Applied Petroleum Reservoir Engineering, segunda edición, capítulo 1, 1991.

[3] Propiedades de la Roca Yacimiento, Clasificación de la Porosidad, http://www.dasilvasystems.com/cursos/propiedades-roca-yacimiento/clasificacion-porosidad.html, 2007.

[4] Narsavage-Heald Donna, Chemistry Department, University of Scranton, Diseño y Aplicación de Dispersantes para el Dióxido de Carbono, http://academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/generalchemistry/generalmodulespan.html, 2007.

[5] Recursos en Red, El Dióxido de carbono, http://www.fq.profes.net/especiales2.asp?id_contenido=44796, 2007.

[6] Haskel International Inc., Liquid pump catalog, www.haskel.com, 2007.

[7] Swagelok, One Piece Instrumentation Ball Valves, catalog, www.swagelok.com, 2007.

[8] High Pressure Equipment Company, Taper Seal Valves, Fittings and Tubing, www.highpressure.com, 2007.

[9] Frost & Sullivan Research Service, North American Pneumatic Filters / Regulators / Lubricators and Accessories Markets, http://www.frost.com/prod/servlet/report-brochure.pag?id=F170-01-00-00-00#report-technologies, 2005.

[10] Blancoh Fluid Controls / Sentry Pulsation Dampeners, http://www.blacoh.com/sentry.html, 2007.

[11] Swagelok, Check Valves, catalog, www.swagelok.com, 2007.

[12] Mihai Vasilache, SCAL. Inc, Carbon Dioxide Solvent Flush, mv@scalinc.com, www.scalinc.com, 2007.