

CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA DE ROCAS POR MEDIO DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X TAC

Andrés F. Ortiz Meneses^{1*}, José M. Plata Chaves², Edwar Herrera Otero³, Nicolás Santos Santos⁴

*A Quien Debe Dirigirse La Correspondencia.

RESUMEN

La tomografía axial computarizada de rayos-X (TAC) es actualmente una técnica ampliamente usada en el estudio de las rocas debido a que permite la inspección de su estructura interna de una manera no destructiva y la cuantificación indirecta de algunas de sus propiedades básicas. El presente artículo presenta una metodología para la adquisición e interpretación de imágenes TAC sobre rocas y el cálculo de sus propiedades, principalmente el número atómico efectivo, la densidad total y la porosidad. Los escaneos se realizan sobre núcleos completos y plugs. La metodología se divide principalmente en tres secciones, en la primera se presenta todo lo correspondiente a la adquisición de las imágenes a nivel de laboratorio. En la segunda sección se expone los procedimientos de corrección de imágenes y los procedimientos de cálculo. Finalmente, en la última sección se muestra los análisis que se pueden realizar en base a las propiedades estimadas de las rocas.

Palabras clave: Tomografía computarizada, Caracterización estática, Propiedades de roca.

STATIC ROCK CHARACTERIZATION OF ROCKS USING X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY CT

ABSTRACT

X-ray Computed tomography (CT) is now widely used in the study of rocks due to allowing inspection of its internal structure of a non-destructive way and indirect quantification of some of their basic properties. This paper presents a methodology for the acquisition and interpretation of CT images on rocks and calculating their properties, mainly the effective atomic number, bulk density and porosity. The scans are performed on full diameter cores and plugs. The methodology is mainly divided into three sections; in the first one all of the acquisition of images at the laboratory is presented. In the second section the methods of image correction and calculation procedures are exposed. Finally, in the last section analyzes that can be performed based on the estimated properties of rocks shown.

Keywords: Computed tomography, Static characterization, Rock properties.

1. Ingeniero de petróleos. Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: afortizm@uis.edu.co

2. Geólogo. Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: mauriciowhl@gmail.com

3. Geólogo. Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: eherrero@uis.edu.co

4. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia. E-mail: nicolas@uis.edu.co



INTRODUCCIÓN

La tomografía axial computarizada de rayos-X (CT) es una técnica no intrusiva que permite la exploración de la estructura interna de los cuerpos. Una de las aplicaciones básicas de la TAC en la industria de los hidrocarburos, es servir de apoyo en la descripción y caracterización de rocas, tanto de manera cualitativa como cuantitativa. Es evidente que la primera facilidad que proporciona la TAC es permitir la inspección visual del interior de la roca de una manera no destructiva, permitiendo la identificación de fracturas, planos de estratificación, heterogeneidades, barreras de baja permeabilidad, zonas invadidas por lodo, mejores zonas para la toma de plugs y entre otras características que no son apreciables al ojo humano (Hunt, P., Engler, P., and Bajsarowicz C. 1988), todo esto sin que sea necesario extraer el núcleo del barril de almacenamiento o descongelarlo. Diversos autores han utilizado esta herramienta para el estudio de sistemas de fracturas (Honarpour, M., et al, 1986), (Honarpour, M., et al, 1986), (Bergosh, J., et al, 1985), (Sprunt, E. 1989.), (Moss, R., Pepin, G., and Davis L. 1990) y el estudio de núcleos no consolidados (MacGregor, K., et al, 1991). Una compilación y clasificación de estudios del sector hidrocarburos apoyado en la TAC se encuentra en el trabajo de Withjack (Withjack, E., et al, 2003). Note que en este estudio se exponen tanto trabajos de caracterización de roca como de experimentos de flujo de fluidos monitoreados con TAC. El presente artículo hace referencia principalmente a la utilidad de esta técnica en la estimación de propiedades de roca y sintetiza una metodología para la descripción cuantitativa de esta recopilando las distintas técnicas expuestas en trabajos anteriores. Las propiedades que se estiman por medio de las imágenes TAC son densidad total y número atómico efectivo; también se propone una aproximación para la porosidad. Los principios físicos que permiten el cálculo de propiedades se exponen a continuación.

PRINCIPIO FÍSICO DE LA TAC

En términos generales, la tomografía es la técnica de obtener diferentes imágenes de cortes de un objeto, de manera que se puede apreciar su estructura interna. Para lograr esto, la TAC aprovecha la diferencia que existe en la atenuación producida por diferentes materiales sobre los rayos-X que los atraviesan, de manera que las imágenes obtenidas de los cuerpos estudiados son representaciones gráficas de los diferentes coeficientes de atenuación que tienen éstos, los cuales son discretizados en pequeñas unidades a las que se les asigna un único valor de atenuación y que reciben el nombre de *voxels*. El tamaño de un vóxel determina la resolución del tomógrafo, es decir, cuantas más pequeñas sean las

dimensiones de los *voxels* mayor será la capacidad del equipo para describir estructuras pequeñas.

De acuerdo con lo anterior, el tomógrafo debe determinar un elevado número de incógnitas por cada corte (*slice*), por esto es necesario que la emisión de rayos-X se realice desde diferentes ubicaciones y ángulos, asegurando que existe un igual número de ecuaciones que permitan solucionar el sistema y calcular el coeficiente de atenuación de cada vóxel. Para lograr esto, se han propuesto diferentes configuraciones de equipos TAC, siendo los denominados de tercera y cuarta generación las más usadas actualmente. Los equipos de tercera generación funcionan con una fuente de rayos-X que rota simultáneamente junto con detectores ubicados al lado opuesto de ésta; por otro lado, en los equipos de cuarta generación, sólo la fuente rota, mientras que se tiene un anillo estático de receptores a lo largo de toda la circunferencia (Ramírez, J., et al, 2008). Ambas configuraciones son ilustradas en la Figura 1.

Por otro lado, es importante señalar que la atenuación que producen los materiales se debe fundamentalmente a dos fenómenos: el efecto fotoeléctrico, que es gobernado por la densidad y el número atómico del material y la energía del fotón, y el efecto Compton que depende sólo de la densidad y la energía (Hunt, P., Engler, P., and Bajsarowicz C. 1988). Note que del coeficiente de atenuación de un vóxel, las propiedades que se pueden inferir son su número atómico efectivo y su densidad total.

PROCEDIMIENTO DE ESCANEADO DE ROCAS Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

En esta sección se exponen los protocolos a seguir para obtener de la tomografía información de calidad y útil para las estimaciones que se desean hacer.

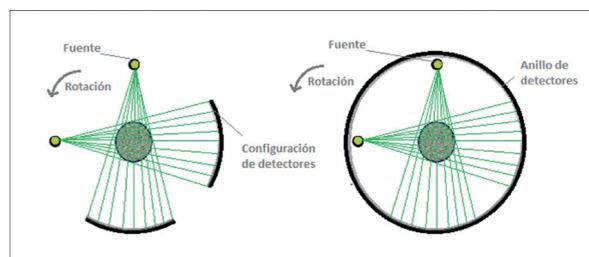


Figura 1. Configuración de escáner TAC. Izquierda: equipo de tercera generación. Derecha: equipo de cuarta generación.

ESCÁNER TAC

El equipo TAC debe ser un escáner médico de energía graduable, de manera que se pueda realizar escaneo a energía alta (superior a 100 kV) y energía baja (Inferior a 100 kV) (Wellington, S., and Vinegar, H. 1987). Actualmente, Los escáner multicorte de 64 cortes axiales por rotación o más, son ampliamente usados con el fin de obtener tiempos de escaneo competitivos en la industria.

Antes de cualquier tipo de adquisición, es necesario comprobar que el equipo se encuentra calibrado, para esto se realiza el *Quality Check* (QC), que el escáner tenga programado en sus protocolos automatizados. Se debe realizar QC siempre en los siguientes casos:

- Después de cada doce (8) horas de trabajo continuas.
- Cada vez que se enciende el equipo.

En caso de que el QC demuestre que el equipo se encuentra fuera de rango, es necesario aplicar el procedimiento estándar de calibración que tenga el escáner, y que debe estar programado de acuerdo a las indicaciones del fabricante. Generalmente, los equipos actuales utilizan diferentes configuraciones en las cuales se escanean materiales de propiedades conocidas para ajustar a los valores esperados.

PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la adquisición de imágenes la muestra se puede presentar en cualquier de las siguientes maneras:

- Muestras tamaño plug sin saturar
- Núcleos dentro de barril de aluminio
- Preservada en Parafina
- Roca expuesta

En todo caso se debe conocer claramente la orientación de la muestra. La muestra se ubica para que la adquisición de imágenes se realice desde el tope hacia la base. Por otro lado, de acuerdo a la norma API RP 40 , todos los segmentos deben estar marcados por un par de líneas paralelas longitudinales roja y negra para identificar el tope de la formación, estas líneas debe colocarse hacia la parte superior de la muestra. La Figura 2 ilustra la situación.

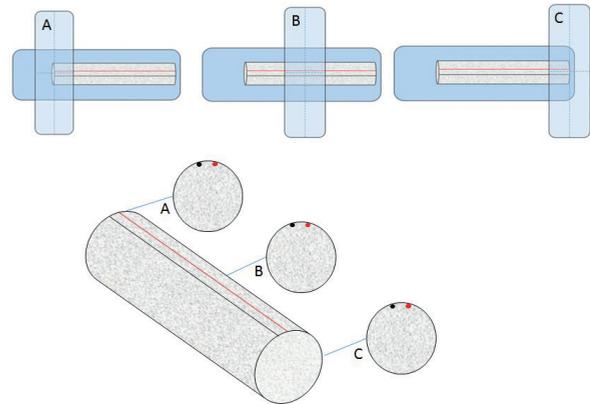


Figura 2. Diagrama de posicionamiento de muestras.

Si la muestra tiene abrazaderas de metal, éstas se deben quitar para evitar artefactos de imágenes. No se debe quitar los tapones de caucho que aíslan los fluidos en las muestras preservadas.

USO DE FANTASMAS

La muestra debe estar posicionada junto con tres (3) materiales de referencia a los que se les conoce el número atómico efectivo y el valor de densidad (fantasmas).

Estos fantasmas deben tener una forma cilíndrica y posicionarse longitudinalmente (eje z) a lo largo de toda la muestra a escanear, ya que es importante asegurar que todo corte que se obtenga del núcleo esté acompañado por la imagen de los tres fantasmas.

La Tabla 1 muestra un listado de posibles materiales para los fantasmas y sus propiedades de número atómico y densidad de acuerdo a los valores registrados por Siddiqui y Khames (Siddiqui, S., and Khamees, A. 2004).

Tabla 1. Listado de Fantasmas recomendados.

Compuesto	Fórmula	Densidad (g/cm ³)	Número atómico efectivo
Agua	H ₂ O	1,000	7,5195
Teflón	CF ₂ =CF ₂	2.160	8.7000
Cuarzo fundido (vidrio)	SiO ₂	2,200	11,7842
Aluminio puro	Al	2,700	13,0000

Los fantasmas deben ubicar de la manera más práctica para ahorrar espacio, en una configuración similar a la mostrada en la Figura 3. Los fantasmas se pueden ubicar en cualquier orden.

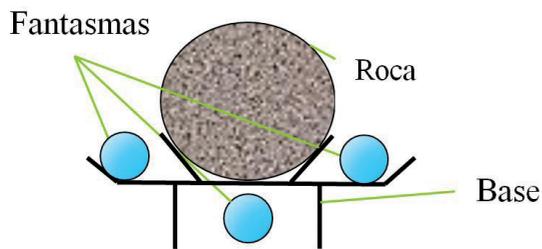


Figura 3. Ubicación de la muestra y los fantasmas - corte transversal.

ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES

Una vez se tiene preparada la muestra de acuerdo a las indicaciones previas, se procede a realizar su escaneo. Se debe escanear una sola sección de 3 pies por vez.

Se recorre toda la muestra a un nivel de energía alto, asegurando que se capture la totalidad de la roca y que cada corte realizado se encuentre acompañado por los cortes de los tres fantasmas. El procedimiento se repite para un nivel de energía bajo. Es importante señalar que la muestra no se debe mover nunca entre las dos adquisiciones. Los archivos que se obtienen se guardan según el estándar DICOM (*Digital Communication in Medicine*). Las imágenes salvadas según el estándar DICOM, contienen matrices numéricas en donde se almacenan los coeficientes de atenuación en unidades de número CT (CTN). Para este caso tienen dos conjuntos de imágenes por cada sección escaneada, uno a alta y otro a baja energía.

El tiempo de adquisición de las imágenes con un escáner de 64 cortes axiales y un espaciamento de 0.5 mm por corte, puede ser de aproximadamente 5 minutos por cada nivel de energía, más 15 minutos de enfriamiento entre cada captura. Los tiempos del escaneo pueden variar dependiendo de las especificaciones del escáner y el espaciamento entre cortes axiales.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES

Las imágenes recién obtenidas del tomógrafo pueden presentar defectos, más precisamente, discrepancias sistemáticas entre la imagen reconstruida y los verdaderos coeficientes de atenuación (artefactos), los cuales deben corregirse antes del inicio de cualquier análisis. El artefacto más común que se presenta en este

caso es el endurecimiento de rayos (*Beam Hardening*). Este artefacto se sucede debido a que el calculo del coeficiente de atenuación lineal es dependiente de la energía, y al hecho que la fuente de rayos X emite un haz policromático. Una ilustración de los efectos del beam hardening se muestra en la Figura 4, es importante señalar que el material mostrados es en teoría homogéneo, por lo que deberían exhibir iguales coeficientes de atenuación a lo largo de todo su volumen (una misma tonalidad de gris), pero como se puede apreciar, por efectos del endurecimiento de rayos, los bordes presentan mayores coeficientes de atenuación que las zonas centrales.

CÁLCULO DE DENSIDAD TOTAL Y NÚMERO ATÓMICO EFECTIVO

Una vez se han corregido los artefactos de imágenes se procede su análisis y al cálculo de la densidad total y el número atómico efectivo para cada vóxel. Estas propiedades pueden ser obtenidas a partir de las imágenes ya que de acuerdo a la ley de Beer-Lambert el coeficiente de atenuación lineal depende de la composición y la densidad del material y la energía de los fotones (Calzado, A., and Geleijns, J. 2010).



Figura 4. Efectos del *beam hardening*

Los números CT de cada vóxel pueden ser relacionados directamente con la densidad total y el número atómico efectivo del mismo como se muestra en las ecuaciones (1) y (2), cuya deducción se muestra en el trabajo de Siddiqui y Khamees (Siddiqui, S., and Khamees, A. 2004).

$$\rho_b = A * CTN_{low} + B * CTN_{high} + C \tag{1}$$

$$Z_{eff} = \left[\frac{D * CTN_{low} + E * CTN_{high} + F}{0,9342 * \rho_b + 0,1759} \right]^{\frac{1}{3,6}} \tag{2}$$

Donde:

ρ_b = es la densidad total (*bulk density*)

CTN_{low} = CTN a baja energía

CTN_{high} = CTN a alta energía

Z_{eff} = número atómico efectivo.

$A-F$ = coeficientes de ajuste que se deben determinar por cada corte (*slice*).

Note que es necesario determinar los valores de los coeficientes de la A a la F, para esto se hace uso de las propiedades conocidas de los fantasmas. Primero, los coeficientes A, B y C se obtienen planteando la ecuación (1) para los tres fantasmas, lo que proporciona un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas que se puede resolver con cualquier método de solución, posteriormente, una vez es conocido el valor de densidad, se realiza el mismo procedimiento para la ecuación (2). Es importante señalar que para elegir los valores de número CT (CTN_{low} y CTN_{high}) que se usan por cada fantasma en las ecuaciones, se debe determinar la moda de los CTN que se tienen en su dominio.

Una vez los coeficientes de ajuste son determinados, las ecuaciones (1) y (2) se aplican sobre los *vóxeles* de la roca, de esta forma se obtienen valores de densidad total y número atómico efectivo para cada píxel (*vóxel*) en la imagen; este procedimiento debe repetirse para cada corte (*slice*), es decir, los coeficientes de ajuste, deben calcularse en cada corte analizar, por esto es importante que los fantasmas aparezcan en todos los cortes de la imagen y que sean homogéneos.

Para poder realizar comparaciones con los registros generales, los valores de Z_{eff} pueden convertirse a factor fotoeléctrico (PEF) por medio de la ecuación (3).

$$PEF = \left[\frac{Z_{eff}}{10} \right]^{3.6} \quad (3)$$

ANÁLISIS POSTERIORES

Una vez las anteriores propiedades son estimadas se procede a la estimación de tipos de rocas o litotipos, para esto, se realiza un gráfico cruzado de la densidad total contra el PEF o el número atómico efectivo, tal como se muestra en la Figura 5. La concentración de los puntos en el gráfico permite definir rocas de características similares para agruparlas en familias. La selección de estos litotipos debe realizar a criterio del profesional encargado basándose en lo observado en el gráfico cruzado y en las imágenes de tomografía; también se deben tener en cuenta los valores de PEF esperados de acuerdo la composición

química de la roca, una primera aproximación puede obtenerse de las cartas de interpretación de registros Lith-3 y Lith-4 (Schlumberger. 2009) las cuales permiten una identificación aproximada de la litología de la roca. Rangos de composición química de la roca de acuerdo a su PEF puede encontrarse en la Tabla 2.

La Figura 5 muestra un esquema de un gráfico cruzado en donde la mayor concentración de puntos se muestra en rojo, mientras que la menor aparece en azul, en este caso, se observa una alta cantidad de puntos en la zona con PEF aproximado a 1.9 y densidad cercana a 2.3 (A), lo que indica alta presencia de una arenisca de porosidad media (densidad media); también se puede ver una población de PEF similar y densidad mayor indicando arenas de baja porosidad (B) y un tercer grupo disperso que presenta un PEF mayor, indicando arenas menos limpias (C); de acuerdo a las observaciones anteriores, el gráfico cruzado se puede dividir en tres regiones como se muestra en la Figura 6, asignando un litotipo a cada una. Note que si en la construcción de la gráfica cruzada se usarán los valores determinados de cada *vóxel* se producirían volúmenes de datos muy grandes, por esto, se debe tomar un único valor representativo por cada corte axial, el cual corresponde a la moda de los valores del corte.

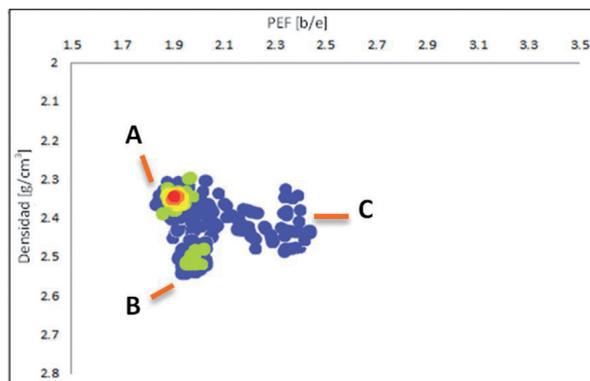


Figura 5. Esquema de un gráfico cruzado

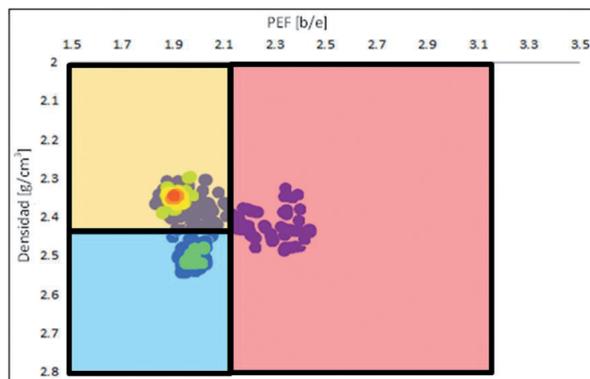


Figura 6. División por litotipos.

ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD ABSOLUTA

Para el cálculo de la porosidad se usa un procedimiento similar al propuesto por Siddiqui y Khamees (Siddiqui, S., and Khamees, A. 2004):

1. Determinar el tipo de roca y la densidad de grano de acuerdo a los valores obtenidos PEF y los rangos exhibidos en la Tabla 2. Es importante señalar que esta tabla se elaboró seleccionando valores promedios mostrados en las cartas de interpretación de registros Lith-3 y Lith-4 (Schlumberger. 2009), además, se debe tener en cuenta que estos límites son una guía y no deben considerarse estrictamente, también se debe tener en cuenta el criterio del profesional encargado de acuerdo a las imágenes y los valores de densidad calculados.

Tabla 2. Rangos de PEF para diferentes rocas.

Rango (barns/e)	Litología	Densidad de grano ρ_g (g/cm ³)
PEF ≤ 2.5	Arenisca	2.65
2.5 < PEF ≤ 4.1	Dolomita	2.87
4.1 < PEF ≤ 5.1	Calcita	2.71

2. Calcular la porosidad de la roca por medio de la ecuación (4). Esta ecuación se obtiene de la definición de densidad total. Es importante señalar que la porosidad calculada en este caso es la absoluta.

$$\phi = \frac{\rho_g - \rho_b}{\rho_g - \rho_f} \tag{4}$$

MÉTODO ALTERNATIVO DE CÁLCULO DE POROSIDAD EN PLUGS

También se propone un método alternativo para el cálculo de la porosidad efectiva en taponos y que permite una medición más directa ya que no depende de la estimación de otras propiedades como densidad o litología, además.

Este método se basa en las ecuaciones expuestas por otros autores (Funk, J., Withjack, E., and Siddiqui, S. 2011), (Coles, M., et al, 1995) funciona realizando tomografía al plug a dos estados de saturación diferentes, es decir, primero se realiza la tomografía cuando la muestra está totalmente saturada de un fluido, y posteriormente se

realiza de nuevo la adquisición de imágenes pero esta vez con la muestra completamente saturada por otro fluido.

Para aplicar este método se deben seguir el siguiente procedimiento:

Realizar la tomografía sobre el plug completamente seco siguiendo los protocolos de preparación y calibración expuestos en este documento. Adquirir imágenes a un nivel de energía alto (adquisición 1) usando un fantasma con el mismo líquido que saturará la muestra. Saturar totalmente la muestra con salmuera o agua destilada y escanear al mismo nivel de energía que antes (adquisición 2).

Debido a que la TAC presenta una desviación entre una adquisición y otra (Kantzas, A., and Marentette, D. 1992), es necesario realizar una corrección antes de comparar las imágenes, para esto, en cada par de cortes, se resta al CTN del fantasma en la adquisición 2, el valor del mismo en la adquisición 1; la cantidad obtenida debe ser sustraída de todos los vóxel de interés de la adquisición 2. Por ejemplo, si para el primer corte del plug en la adquisición 1 el fantasma exhibió una moda CTN igual a 10, mientras que para la adquisición 2 de este mismo corte, el fantasma mostro un valor modal de CTN igual 15, es necesario que a todos los vóxel de la adquisición 2 se les sustraiga 5 unidad CT para guardar coherencia entre las imágenes.

Después de realizar la corrección anterior, la ecuación (5) puede ser aplicada en un cálculo vóxel a vóxel o corte a corte para obtener distribuciones de porosidad, la porosidad efectiva total se obtiene finalmente promediando estos valores. Es importante señalar que si se desea hacer el cálculo vóxel a vóxel, la muestra no debe moverse entre una adquisición y otra, es decir, se debe saturar sin retirarse del escáner, lo que se realiza normalmente usando un equipo de inyección de fluidos.

$$\phi = \frac{CTN^1 - CTN^2}{CTN_{aire}^1 - CTN_{fan}^1} \tag{5}$$

Donde:

CTN^A = atenuación en el vóxel o el corte en la adquisición A.

CTN_{fan}^1 = atenuación del fantasma en la adquisición 1.

CTN_{aire}^1 = atenuación del aire en la adquisición 1, la cual se puede obtener de un espacio vacío en la tomografía.

CONCLUSIONES

En el presente documento se expuso el procedimiento para la caracterización de rocas por medio de TAC la cual incluye cálculo de propiedades como la densidad total, el número atómico efectivo y la porosidad, por medio del enfoque de doble energía.

Por otro lado, se puede afirmar que la TAC es una herramienta de gran utilidad en el análisis de núcleos debido a que permite una identificación práctica y no intrusiva de tipos de rocas, lo que contribuye a una mejor elección de las zonas para extraer tapones y a una mejor caracterización estática de los yacimientos. De igual manera, su capacidad de visualizar el interior de las muestras permite tener un registro digital de los núcleos incluso en su estado de preservación.

AGRADECIMIENTOS

A los autores les gustaría agradecer a la Universidad Industrial de Santander y al Grupo de investigación de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

1. American Petroleum Institute. 1998. "Recommended Practice for Core Analysis - API RP 40," API.
2. Bergosh, J., Marks, T., and Mitkus, A. 1985. "New Core Analysis Techniques for Naturally Fractured Reservoirs," in SPE California Regional Meeting, Bakersfield.
3. Calzado, A., and Geleijns, J. 2010. "Computed Tomography. Evolution, technical and applications," Revista de Física Médica, pp. 163-180.
4. Coles, M., Muegge, E., Auzeais, F., Frulla, P., and Kantzas, A. 1995. "The Use of Attenuation Standards for CT Scanning," Special Core Analysis, pp. 1-12.
5. Funk, J., Withjack, E., and Siddiqui, S. 2011. "Core imaging - Twenty five years of equipment, techniques, and applications of X-ray computed tomography (CT) for core analysis," SCA, vol. 25, no. SCA2001-25, pp. 1-12.
6. Honarpour, M., McGee, K., Crocker, M., and Maerefat, N. 1986. "Detailed Core Description of a Dolomite Sample from the Upper Madison Limestone Group," in SPE Rocky Mountain Regional Meeting, MT.
7. Hunt, P., Engler, P., and Bajsarowicz C. 1988. "Computed tomography as a Core Analysis Tool: Applications, Instrument Evaluation and Image Improvement Techniques," Journal of Petroleum Technology, pp. 1203-1210.
8. Kantzas, A., and Marentette, D. 1992. "Computer-assisted tomography: from qualitative visualization to quantitative core analysis," The Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 31, no. 9, pp. 48-56.
9. MacGregor, K., Park, E., and Sincock, K. 1991. "Effective Unconsolidated Core Preservation in the Arctic Environment: An Aid to Accurate Reservoir Evaluation," in the International Arctic Technology Conference, Anchorage.
10. Moss, R., Pepin, G., and Davis L. 1990. "Direct Measurement of the Constituent Porosities in a Dual Porosity Matrix," in Fourth Annual Technical Conference of the Society of Core Analysts, Dallas.
11. Ramírez, J., Arboleda, C., and McCollugh, C. 2008. "Tomografía computarizada por rayos X: fundamentos y actualidad," Revista Ingeniería Biomédica, vol. 2, no. 4, pp. 13-31.
12. Schlumberger. 2009. Log Interpretation Charts, Sugar Land, Texas: Schlumberger.
13. Siddiqui, S., and Khamees, A. 2004. "Dual-Energy CT-Scanning Applications in Rock Characterization," SPE, pp. 1-9.
14. Sprunt, E. 1989. "Arun Core Analysis: Special Procedures for Vuggy Carbonates," The Log Analyst, no. 353.
15. Wellington, S., and Vinegar, H. 1987. "X-Ray Computerized Tomography," Journal of Petroleum Technology, no. SPE 16983, pp. 885-898.
16. Withjack, E., Devier, C., and Michael, G. 2003. "The Role of X-Ray Computed Tomography in Core Analysis".

Recepción: 7 de Marzo de 2015

Aceptación: 24 de Mayo de 2015