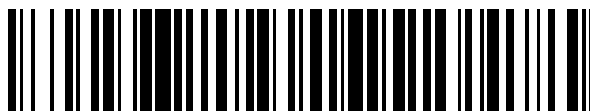


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 655 170**

51 Int. Cl.:

G01N 9/24 (2006.01)

G01N 23/087 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.06.2012 PCT/US2012/043213**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.01.2013 WO13015914**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.06.2012 E 12733295 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.10.2017 EP 2737297**

54 Título: **Procedimiento para estimar la densidad aparente de muestras de roca utilizando tomografía computarizada por rayos L de doble energía**

30 Prioridad:

26.07.2011 US 201161511600 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

19.02.2018

73 Titular/es:

**INGRAIN, INC. (100.0%)
3733 Westheimer Road 2nd Floor
Houston, TX 77027, US**

72 Inventor/es:

DERZHI, NAUM

74 Agente/Representante:

DURAN-CORRETJER, S.L.P

ES 2 655 170 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para estimar la densidad aparente de muestras de roca utilizando tomografía computarizada por rayos X de doble energía

5

Esta solicitud reivindica el beneficio bajo el título 35, Código de Estados Unidos, §119(e) de la solicitud de patente provisional de EE.UU. No. 61/511.600 anterior, presentada el 26 de julio de 2011, que se incorpora en su integridad por referencia en este documento.

10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Esta invención se refiere al campo de la física de rocas a través de medios digitales, y específicamente a procedimientos para estimar el número atómico efectivo y/o la densidad aparente de muestras de roca.

15 Las mediciones de la densidad y el número atómico efectivo de testigos de pozos son valiosas para los ingenieros de yacimientos. Las densidades aparentes dan una indicación de la porosidad y el número atómico efectivo proporciona una indicación de la mineralogía.

Existen varias maneras de poder estimar la densidad y el número atómico efectivo incluyendo:

20

1. Pueden extraerse muestras físicas del pozo y puede medirse la densidad pesando la muestra, calculando su volumen y simplemente dividiendo el peso por el volumen.

2. Pueden utilizarse herramientas de diagrafía de sondeo para estimar la densidad y el número atómico efectivo. Se utilizan técnicas de rayos gamma-gamma para estimar la densidad y el número atómico efectivo a partir de la

25

absorción de rayos gamma a medida que atraviesa la roca en el pozo.

3. Pueden utilizarse escáneres de tomografía computarizada para estimar la densidad y el número atómico efectivo midiendo la atenuación de los rayos X en dos niveles de energía diferentes y después utilizando las mediciones para calcular la densidad y el número atómico efectivo.

30 En los años 70, los escáneres de tomografía computarizada por rayos X (escáneres TC) comenzaron a utilizarse en la formación de imágenes médicas. En los años 80, estos escáneres se aplicaron a muestras de roca extraídas de pozos (testigos). Los escáneres de TC tienen la ventaja de una mayor resolución que las diagrafías de rayos gamma y no resultan afectados por las condiciones ambientales como lo son las diagrafías de rayos gamma-gamma en el fondo del pozo. Además, los escáneres de TC producen una distribución 3D de las propiedades de la roca en la muestra, mientras que las diagrafías sólo proporcionan una distribución 1D.

35

Wellington y Vinegar (Wellington, S.L. and Vinegar, H.J., "X-Ray Computerized Tomography," JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY, 1987) estudiaron el uso de escáneres de TC en geofísica. La atenuación de los rayos X depende tanto de la densidad electrónica (densidad aparente) como del número atómico efectivo.

40

$$\mu = \rho \left(a + \frac{bZ^{3.6}}{E^{3.2}} \right) \quad (1)$$

donde μ , es el coeficiente de atenuación lineal de los rayos X

ρ es la densidad aparente

45

Z es el número atómico efectivo

E es la absorción fotoeléctrica

a y b son constantes.

Los escáneres de TC médica proporcionan volúmenes 3D de valores de TC, que están en relación lineal con el coeficiente de atenuación, μ . El primer término en la ecuación (1) es significativo a elevados niveles de energía de rayos X (por encima de 100kv) mientras que el segundo término es significativo a bajos niveles de energía de rayos X (por debajo de 100kv). Por lo tanto, puede utilizarse un barrido de doble energía para efectuar estimaciones tanto de la densidad aparente como del número atómico efectivo. Considerando una exploración de doble energía, la ecuación (1) conduce a las siguientes ecuaciones:

55

$$\rho = A * CT_{high} + B * CT_{low} + C \quad (2)$$

$$\rho Z_{eff}^A = D * CT_{high} + E * CT_{low} + F \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del objeto,

Z_{eff} es su número atómico efectivo,

5 A, B, C, D, E, F son coeficientes,

CT_{high} y CT_{low} son valores de TC por rayos X del objeto obtenidos a altas y bajas energías de cuantos de rayos X,

α es aproximadamente 3,8.

10 Tal como se indica, por ejemplo, por Siddiqui, A. y Khamees, A. A., "Dual-Energy CT-Scanning Applications in Rock Characterization," SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2004, SPE 90520, la estimación del número atómico efectivo y distribuciones de densidad aparente en muestras de testigos a partir de TC por rayos X de doble energía implica:

15 a) Adquirir una imagen por TC por rayos X del objeto diana junto con al menos tres objetos (objetos de calibración) con densidad conocida y número atómico efectivo conocido. En el caso de testigos, el eje del testigo está alineado con el eje Z de la imagen (véase la figura 1).

b) registrar los valores de TC de alta/baja energía de los objetos de calibración y el objeto diana y calcular su media en cada objeto y/o en cada sección XY de cada objeto.

20 c) utilizar las propiedades conocidas de los objetos de calibración y sus valores de TC de alta/baja energía, resolver el sistema de ecuaciones (2,3) para determinar los coeficientes A, B, C, D, E, F.

d) utilizar los valores de TC alto y bajo del objeto diana y los coeficientes procedentes de la etapa c), calcular la densidad y el número atómico efectivo del objeto diana a partir de las ecuaciones (2,3).

e) calcular las diagráfias de densidad y número atómico efectivo promediando los valores de densidad y número atómico efectivo en cada sección X-Y del barrido.

25

Típicamente, las etapas b) y c) se realizan para cada sección de la imagen de TC paralela a la trayectoria de los rayos X (por ejemplo, cada sección X-Y), y la etapa d) se realiza en cada punto (por ejemplo, vóxel) de la imagen 3D, utilizando los coeficientes determinados para la sección X-Y correspondiente.

30 El problema con esta estrategia es que el modelo determinado por las ecuaciones (2,3) no explica todos los efectos implicados en el proceso de la tomografía computarizada por rayos X. Como resultado, los valores de densidad obtenidos en la etapa d) y promediados sobre el objeto diana no siempre coinciden con las densidades del objeto determinadas por medición física directa, masa dividida por volumen. Un ejemplo que utiliza el procedimiento tradicional para estimar la densidad aparente y el número atómico efectivo para una muestra de esquisto se muestra
35 en la figura 2 y las figuras 3a-b.

Las densidades calculadas son en su mayoría inferiores a las medidas, con el error superando a veces el nivel típicamente aceptable del 5 %. No existe correlación visible entre los valores de densidad medidos y calculados (coeficiente de correlación = -0,27).

40

Además, la relación entre los valores del número atómico efectivo y la densidad aparente calculados a partir del procedimiento de doble energía a menudo es muy difícil de explicar por los modelos de física de rocas aceptados, con la situación de que la densidad de la roca es, en general, creciente con el incremento del número atómico efectivo. Véase, por ejemplo, la figura 3a) muestra los valores del número atómico efectivo trazado frente a la densidad aparente para una muestra de esquisto obtenidos por medición directa, y presenta en general un
45 incremento en la densidad cuando el número atómico efectivo es creciente. La tendencia en la figura 3b), que representa el número atómico efectivo trazado frente a la densidad aparente promediada calculada muestra una tendencia casi opuesta. Este efecto fue observado por Boyes (Boyes, J., "The Effect of Atomic Number and Mass Density on the Attenuation of X-rays," QUEEN'S HEALTH SCIENCES JOURNAL, 2003). Por otra parte, los errores
50 del número atómico efectivo están dentro de límites aceptables. Un ejemplo de una coincidencia entre el número atómico efectivo obtenido a partir de la composición mineral de la muestra y el número atómico efectivo estimado con el procedimiento de doble energía se muestra en la figura 4.

Por consiguiente, las estrategias anteriores para estimar la densidad y/o el número atómico efectivo de muestras de
55 roca o testigos de pozos han demostrado no ser suficientemente exactas para proporcionar información adecuada a la industria de perforación y recuperación de hidrocarburos. Existe una necesidad de un procedimiento más exacto (o varios) para estimar números atómicos efectivos y densidades aparentes de muestras de roca. Además, tiene que proporcionarse un procedimiento para estimar el número atómico efectivo y/o la densidad aparente de muestras de roca que venza uno o más de los problemas identificados anteriormente.

RESUMEN DE LA INVENCION

Una característica de la presente invención es el proporcionar un procedimiento mejorado para estimar el número atómico efectivo y la densidad aparente de muestras de roca utilizando imágenes de tomografía computarizada por rayos X.

Una característica adicional de la presente invención es el proporcionar un procedimiento para reducir el error entre la densidad aparente tal como se mide en un laboratorio físico y la densidad aparente estimada creando una corrección de error que es una función del número atómico efectivo.

Una característica adicional de la presente invención es el generar tendencias de número atómico efectivo y densidad aparente estimada que son coherentes con la relación esperada entre el número atómico efectivo y la densidad aparente.

Características y ventajas adicionales de la presente invención se expondrán en parte en la descripción que viene a continuación, y en parte resultarán evidentes a partir de la descripción, o pueden aprenderse por la práctica de la presente invención. Los objetivos y otras ventajas de la presente invención se llevarán a cabo y se alcanzarán por medio de los elementos y combinaciones señalados en particular en la descripción y las reivindicaciones adjuntas.

Para conseguir estas y otras ventajas, y de acuerdo con los propósitos de la presente invención, tal como se realiza y describe en líneas generales en este documento, la presente invención se refiere a un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1.

Además, la presente invención se refiere a un procedimiento para estimar la densidad aparente y/o el número atómico efectivo de un objeto diana que puede conseguir un error de densidad inferior a los procedimientos descritos en la técnica anterior. En muestras de testigos se han observado errores de densidad del 2 % o menos entre la densidad calculada (por ejemplo, densidad aparente) y la densidad medida (por ejemplo, densidad aparente).

La presente invención se refiere además a un procedimiento para estimar la densidad aparente de un objeto diana de modo que el coeficiente de correlación entre la densidad calculada y la densidad medida es superior a las coeficientes de correlación producidos por procedimientos descritos en la técnica anterior. Se han observado coeficientes de correlación en muestras de testigos de al menos 0,7 y superiores, tales como 0,87 o más.

Se entiende que tanto la descripción general anterior como la descripción detallada siguiente son meramente ejemplares y explicativas y se pretende proporcionar una explicación adicional de la presente invención, tal y como se reivindica.

Los dibujos adjuntos, que se incluyen y constituyen una parte de esta solicitud, ilustran características de la presente invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la presente invención.

BREVE DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

La figura 1 es una vista en perspectiva de una muestra de testigo y el sistema de coordenadas utilizado para hacer referencia al testigo.

La figura 2 es un gráfico que muestra una comparación típica de densidades de testigo de esquisto medidas directamente y calculadas con la estrategia de doble energía.

Las figuras 3a y 3b son gráficos que muestran diagramas comparativos de número atómico efectivo (Zeff) frente a las densidades aparentes medida (a) y calculada por un procedimiento convencional (b).

La figura 4 es un gráfico que muestra una comparación entre el número atómico efectivo obtenido a partir de la mineralogía de diversos ejemplos de muestras de arenisca, caliza, y roca dolomita y el número atómico efectivo de las mismas muestras calculado con la estrategia de doble energía.

La figura 5 es un gráfico que muestra la densidad estimada a partir de TC por rayos X de doble energía utilizando el procedimiento propuesto (densidad corregida) frente a la densidad medida.

Las figuras 6a y 6b son gráficos que muestran una comparación de tendencias de Zeff/densidad para la densidad aparente medida (a) y la densidad calculada con el procedimiento de la presente invención (b).

La figura 7 es un dibujo pictórico (no a escala) de un ejemplo de la disposición del objeto de referencia u objeto diana en asociación con los objetos de calibración y la bandeja del escáner.

La figura 8 es un diagrama de flujo que muestra diversos procedimientos para calcular valores medios de la densidad aparente y el número atómico efectivo.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA PRESENTE INVENCION

La presente invención se refiere a procedimientos para estimar la densidad aparente y/o el número atómico efectivo de un objeto diana. El objeto diana puede ser una muestra de roca, o muestra de testigo de pozo, o cuerpo poroso, o cualquier otro objeto que requiera una estimación de la densidad aparente y/o el número atómico efectivo. El objeto diana es generalmente un sólido. El objeto diana podría ser un líquido o contener un líquido. El objeto diana puede ser un objeto recibido desde un sitio de perforación, un sitio de perforación propuesto, un sitio subterráneo, o un sitio a cielo abierto, o cualquier otro lugar donde pueda recuperarse una muestra y donde tenga que estimarse la densidad aparente y/o el número atómico efectivo. En los procedimientos de la presente invención puede procesarse una serie de dos o más objetos diana.

La descripción de más adelante utiliza una muestra completa de testigo de pozo (por ejemplo, el testigo entero o el testigo redondo) como ejemplo del objeto diana, pero ha de entenderse que los procedimientos descritos en este documento se aplican no sólo a muestras de testigos enteros sino a testigos laminados, testigos cortados o rebanados, muestras de roca generalmente y a cuerpos porosos en general y, tal como se indica anteriormente, a objetos diana en general.

La raíz del problema descrito está en la simplicidad del modelo expresado por las ecuaciones (2,3). Este modelo no tiene en cuenta la naturaleza policromática de la energía de rayos X en los escáneres médicos utilizados para escanear muestras de roca tales como testigos enteros utilizando escaneado de TC por rayos X. En la realidad, la presencia del testigo dentro del escáner cambia no sólo la intensidad de los rayos X (lo que en general se compensa mediante los algoritmos de reconstrucción de TC), sino también su espectro. El cambio del espectro se ve afectado de la manera más intensa por el número atómico efectivo del testigo. El efecto también puede cambiar con el tamaño (diámetro) del testigo, el tamaño, y la ubicación de los objetos de calibración, y otros elementos del escáner incluyendo la edad del escáner.

La presente invención es única porque utiliza la observación de que el cambio del espectro se ve afectado de la manera más intensa por el número atómico efectivo del testigo y después la correlación del error en los valores de densidad calculada media del testigo con el número atómico efectivo calculado medio, y la aplicación de la corrección de error a todos los pares densidad/número atómico efectivo calculados. Esto produce el resultado inesperado de que los valores estimados de la densidad aparente calculada promediada están perfectamente correlacionados con la densidad aparente medida, y la tendencia de la densidad aparente estimada y el número atómico efectivo coincide con las tendencias observadas en experimentos de laboratorio.

La presente invención tiene la capacidad de mejorar la estimación de la densidad aparente de un objeto diana de modo que la densidad aparente calculada es más próxima a la densidad medida del mismo objeto diana utilizando el procedimiento de la técnica anterior. Esto se considera el error de densidad (entre la densidad aparente calculada y la densidad aparente medida). Se han observado errores de densidad de menos del 10 %, menos del 5 %, menos del 2 % e inferiores. Este error de densidad puede ser la diferencia entre la media de las densidades calculadas y las densidades medidas del objeto diana y/o puede estar basado en cada punto o barrido individual. La presente invención puede proporcionar un coeficiente de correlación (entre la densidad calculada y la densidad medida) de al menos 0,7. Una correlación perfecta entre la densidad calculada y la densidad medida del mismo objeto diana sería 1,0. El coeficiente de correlación entre la densidad calculada y la densidad medida puede ser al menos 0,75, al menos 0,8, al menos 0,85, al menos 0,9, al menos 0,925, al menos 0,95, o mayor. Esto, de nuevo, puede ser una media de las lecturas y/o estar basado en cada punto/lectura o barrido individual. El coeficiente de correlación puede determinarse de la siguiente manera:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right)$$

donde
 n = número de muestras
 y son medias de muestra
 s = desviación típica.

Con respecto a los dos o más objetos de referencia, estos objetos pueden ser muestras de roca, muestras de testigos de pozos, muestras de testigos de pozos parciales, u otros objetos que tienen una densidad aparente conocida. Cada uno de los objetos de referencia tiene un número atómico efectivo y/o una densidad aparente

diferentes unos de otros. Con respecto a los tres o más objetos de calibración, estos objetos pueden ser materiales líquidos o sólidos tales como polímeros, metales, minerales o compuestos químicos. Cada uno de los objetos de calibración tiene un número atómico efectivo y/o una densidad aparente diferentes de cada uno de los otros objetos de calibración.

5

Con respecto al barrido de los objetos implicados en el procedimiento de la presente invención, el barrido puede llevarse a cabo utilizando un escáner, tal como un escáner de doble energía (por ejemplo, un escáner de TC por rayos X de doble energía). Un dispositivo que puede utilizarse que está disponible comercialmente es un escáner CereTom™. El escáner en sí puede desplazarse para escanear el objeto diana, objetos de referencia y objetos de calibración. Alternativamente, los objetos que son escaneados pueden desplazarse a través de un escáner estacionario. Cualquier opción es posible. Con respecto a la disposición de los objetos, la figura 7 muestra un ejemplo de tal disposición. Se muestra la disposición general de los objetos, (10). El objeto de referencia (12) o el objeto diana (14) pueden estar situados sobre una bandeja (16), por ejemplo, una bandeja de madera, que tiene lado derecho y lado izquierdo. El objeto de referencia o el objeto diana pueden descansar sobre esta bandeja. Además, los tres objetos de calibración, (17a), (17b) y (17c), pueden estar situados adyacentes al objeto de referencia (12) o el objeto diana (14) en cualquier disposición. Los objetos de calibración (17a-17c) pueden estar en contacto con el objeto diana (14) o el objeto de referencia (12) o puede haber cualquier cantidad de espacio entre los objetos de calibración y los objetos de referencia o el objeto diana. Los objetos de calibración (17a-17c) pueden ser sujetos o sostenidos de otro modo en su sitio mediante la bandeja (16). En el ejemplo, los tres objetos de calibración son cuarzo (17a), teflón (17b) y agua (17c), que está dentro de un tubo de vidrio. Los tres objetos de calibración pueden rodear el objeto de referencia o el objeto diana en sentido horario alrededor del objeto de referencia o el objeto diana. Alternativamente, los objetos de calibración pueden tener cualquier relación espacial respecto al objeto de referencia o el objeto diana. De este modo, los objetos de calibración pueden rodear el objeto diana o el objeto de referencia o estar en un lado del objeto diana o el objeto de referencia, o en cualquier otra disposición.

Generalmente, un objeto de referencia o el objeto diana es escaneado a la vez. Como opción, el objeto diana, junto con uno o más objetos de referencia o varios objetos de referencia, pueden ser barridos al mismo tiempo en serie colocándolos secuencialmente en serie sobre la bandeja. Los objetos de referencia y/o el objeto diana pueden colocarse en un soporte, tal como un soporte metálico (por ejemplo, un tubo circular) que descansa sobre la bandeja. Tal como se muestra en la figura 7, el tubo circular (18) puede contener el objeto de referencia o el objeto diana y puede descansar sobre la bandeja (16). Ejemplos de materiales que pueden utilizarse incluyen, pero no están limitados a, aluminio, aleaciones de aluminio, plásticos y similares. No existe ningún aspecto crítico con respecto a la disposición del objeto de referencia, el objeto diana, los objetos de calibración, o componentes opcionales adicionales que se utilizan para sostener estos diversos objetos. Sin embargo, la disposición de todos los objetos durante el barrido de los objetos diana debe ser la misma que la disposición durante el escaneado de los objetos de referencia. La separación entre los tres o más objetos de calibración puede ser cualquier distancia, por ejemplo, puede haber un espacio de 0,1 cm a 10 cm, por ejemplo, 1 cm a 5 cm, y similares, desde cada objeto de calibración.

40

Con respecto a los objetos de calibración, los objetos de calibración pueden ser diferentes unos de otros o iguales entre sí con respecto al tamaño y/o la forma. Los objetos de calibración tienen suficientes vóxeles en cada sección transversal de cada objeto de calibración para el cálculo eficiente de la media de los valores escaneados. Por ejemplo, cada objeto de calibración puede tener 300 vóxeles por sección que es escaneada o más, tales como 300 vóxeles hasta aproximadamente 1000 vóxeles por sección escaneada o más. Ejemplos más específicos incluyen de 400 vóxeles a 500 vóxeles o 400 vóxeles a 1000 vóxeles, o 600 vóxeles a 1000 vóxeles por sección escaneada. Los objetos de calibración, como se ha indicado, pueden tener cualquier forma o tamaño y, por ejemplo, pueden ser circulares, semicirculares, rectangulares, o tener otras formas geométricas. Por ejemplo, el diámetro, si el objeto de calibración es semicircular o circular, puede ser de 1 a 5 cm, por ejemplo, de 2 a 4 cm.

50

Además, cada objeto de calibración puede variar de forma y/o tamaño uno de otro. Preferentemente, el objeto de calibración tiene un tamaño y forma uniformes y, más preferentemente, los objetos de calibración tienen cada uno un tamaño y forma similares, pero esto no es necesario. Los objetos de calibración deberían tener suficiente longitud de modo que el objeto de calibración siempre forme parte de algún escaneado del (de los) objeto(s) de referencia, y/o el objeto diana. Por consiguiente, para los fines de la presente invención, los objetos de calibración tienen una longitud que es igual o mayor que la longitud del objeto de referencia y la longitud del objeto diana.

55

Generalmente, los objetos de calibración preferidos se seleccionan con el fin de abarcar el número atómico efectivo esperado del objeto diana. De este modo, uno o más de los objetos de calibración pueden ser una especie de «punto final», de modo que el número atómico efectivo esperado del objeto diana puede encontrarse entre el

60

número atómico efectivo del uno o más objetos de calibración. Generalmente, aunque no es necesario, cada objeto de calibración tendrá un número atómico efectivo y/o una densidad aparente que difieren unos de otros al menos el 10 %.

- 5 Ejemplos de materiales de objeto de calibración incluyen, pero no están limitados a, agua (que puede estar colocada en un tubo de vidrio), vidrio, cuarzo, teflón, otros materiales poliméricos, otros materiales de base mineral, otros materiales de base líquida, y similares. Siempre que la densidad y el número atómico efectivo del objeto de calibración sean conocidos y los objetos de calibración no incluyan elementos en los que la relación del peso atómico al número atómico sea mayor que aproximadamente 2,1, los objetos pueden servir como objetos de calibración en los presentes procedimientos. Los objetos de calibración deberían ser homogéneos al nivel de resolución del barrido, que es típicamente inferior a 0,2 mm. Como ejemplo adicional, los objetos de calibración son materiales homogéneos a un nivel de resolución de 0,2 mm o menos, tal como 0,1 mm o menos, o 0,05 mm o menos, tal como 0,01 a 0,1 mm, o 0,001 mm a 0,1 mm.
- 10
- 15 Cuando se realiza un procedimiento para estimar la densidad aparente y el número atómico efectivo de un objeto diana, se utilizan los mismos objetos de calibración durante el escaneado de los objetos de referencia y el objeto diana.

- Con respecto a los objetos de referencia, los objetos de referencia tienen generalmente una sección transversal de tamaño y forma igual o similar unos respecto a otros. Además, los objetos de referencia tienen una sección transversal de tamaño y forma similar o igual al objeto diana, y se colocan en un portaobjetos igual o similar, si se utiliza alguno para el objeto diana. Por ejemplo, si el objeto diana es redondo, entonces el objeto de referencia debería ser redondo o aproximadamente redondo con un área de la sección transversal igual o un área de la sección transversal similar. Como ejemplo adicional, los objetos de referencia y el objeto diana deberían tener un área de la sección transversal que esté aproximadamente dentro del 10 % unos de otros, dentro del 5 % unos de otros, dentro del 1 % unos de otros, o dentro del 0,5 % unos de otros. Tal como se indica anteriormente, los objetos de referencia y el objeto diana no tienen que ser de tamaño o forma similares a los objetos de calibración. Ejemplos de objetos de referencia incluyen, pero no están limitados a, cualquier objeto que tenga una densidad aparente conocida, tal como arenisca de Berea. Con respecto al objeto de referencia, sólo tiene que conocerse la densidad aparente con respecto a cada objeto de referencia. Como opción, también puede conocerse el número atómico efectivo de uno o más de los objetos de referencia.
- 20
- 25
- 30

Los objetos de referencia pueden ser circulares, semicirculares, rectangulares, o tener otras formas geométricas. Por ejemplo, en el caso de objetos cilíndricos, los objetos de referencia y los objetos diana pueden tener un diámetro de 5 cm a 15 cm, y pueden ser de cualquier longitud, tal como de 50 cm a 500 cm o más largos, por ejemplo, 1 a 200 cm de longitud.

35

La realización del barrido de TC por rayos X de doble energía de los dos o más objetos de referencia y tres o más objetos de calibración puede producirse en el mismo barrido de TC o puede producirse en múltiples barridos. Generalmente, se utiliza el mismo dispositivo de barrido de TC con los mismos ajustes si se utilizan múltiples barridos. Más adelante se ejemplifican ejemplos de la obtención o determinación de la relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo a partir de los valores de TC del barrido de TC para los objetos de referencia y los objetos de calibración. Pueden realizarse otras relaciones funcionales utilizando estrategias calculadas similares.

40

Es posible realizar el barrido de TC para el objeto diana y los objetos de referencia en un barrido de TC combinado o en múltiples barridos de TC utilizando cualquier combinación de objetos que han de ser escaneados con la restricción de que los objetos de calibración deben estar presentes en todos los barridos. Más adelante se ejemplifica la obtención de la densidad sin corregir y el número atómico efectivo para el objeto diana y la obtención de correcciones de la densidad aparente. También pueden utilizarse otros cálculos y determinaciones.

45

50

La presente invención se refiere a un procedimiento para estimar la densidad aparente y/o el número atómico efectivo de un objeto diana. Este procedimiento de estimación implica el uso de un escáner (por ejemplo, un escáner de TC por rayos X de doble energía) y las determinaciones relacionadas pueden realizarse mediante programas que están presentes en uno o más dispositivos informáticos o pueden estar instalados dentro del propio escáner (por ejemplo, el escáner de TC). Para los fines de la presente invención, las diversas etapas de obtención de la relación funcional pueden realizarse en uno o más programas informáticos y almacenarse en un ordenador o una unidad de disco duro separada u otro dispositivo de memoria. Se comprenderá que los procedimientos de la presente invención se consideran parte de la presente invención, así como los resultados de la realización del procedimiento, incluyendo la densidad aparente corregida y los valores de corrección de densidad aparente obtenidos. Por

55

60

consiguiente, la presente invención se refiere a ordenadores, dispositivos de memoria que contienen los programas que permiten el procedimiento para estimar la densidad aparente y/o el número atómico efectivo.

La correlación entre los errores de valores de densidad y el número atómico efectivo calculado pueden ser diferentes para diferentes escáneres, tamaño del objeto diana y ubicación dentro del escáner, posición relativa de los objetos de calibración y la muestra, pero es independiente de las otras propiedades de los objetos diana y de referencia tales como la composición química, la porosidad y el contenido de fluido, ya que estas se explican totalmente por el número atómico efectivo y la densidad del objeto. La correlación entre los errores de valores de densidad y número atómico efectivo calculado puede adoptar muchas formas tales como lineal, polinómica, exponencial y otras. Dos ejemplos de la correlación son los siguientes:

1. Correlación lineal de errores absolutos de la densidad con el número atómico efectivo, y
2. Correlación lineal de errores relativos de la densidad con el número atómico efectivo.

Los expertos en la materia reconocerán que los procedimientos descritos en este documento son adecuados para otros tipos de correlaciones entre errores en valores de densidad y número atómico efectivo.

El error relativo, ε , de los valores de densidad promediados puede expresarse como una función lineal del número atómico efectivo:

$$\varepsilon = aZ + b \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{\rho_0}$$

donde $\frac{(\rho_c - \rho_0)}{\rho_0}$ = el error relativo de la densidad media,
 ρ_c es la densidad media calculada por el procedimiento de doble energía,
 ρ_0 es la densidad medida de la muestra de roca,
 Z = número atómico efectivo,
 a y b son constantes.

Una vez que se establece la correlación para una configuración de escaneado dada (escáner, tamaño y ubicación del testigo, portatestigo, etc.), se utiliza para corregir los valores de densidad prediciendo el error relativo a partir de los valores Z del objeto diana utilizando la ecuación 4, y después calculando la densidad verdadera, ρ'_c , como

$$\rho'_c = \frac{\rho_c}{1 + \varepsilon} \quad (5).$$

El error absoluto, δ , de los valores de densidad promediados puede expresarse como una función lineal del número atómico efectivo:

$$\delta = cZ + d \quad (6)$$

donde $\delta = \rho_c - \rho_0$ = el error absoluto de la densidad,
 ρ_c es la densidad media calculada por el procedimiento de doble energía,
 ρ_0 es la densidad medida de la muestra de roca,
 Z = número atómico efectivo,
 c y d son constantes.

Una vez que se establece la correlación para una configuración de escaneado dada (escáner, tamaño y ubicación del testigo, portatestigo, etc.), se utiliza para corregir los valores de densidad prediciendo el error relativo a partir de los valores Z del testigo utilizando la ecuación (6), y después calculando la densidad verdadera como

$$\rho'_c = \rho_c - \delta \quad (7).$$

Pueden determinarse estas dos correlaciones y, opcionalmente, otras correlaciones. Como opción, puede seleccionarse una basándose en la minimización del error de densidad después de aplicar la corrección. La corrección de densidad puede aplicarse a cada vóxel en la imagen 3D, a la media de los vóxeles en cada plano X-Y,

la media de todos los vóxeles en la muestra entera, u otras submuestras de toda la muestra.

La presente invención puede aplicarse en casos en los que las distribuciones de valores de densidad y número atómico efectivo se obtienen en cada una de una pluralidad de muestras o en cada una de una pluralidad de ubicaciones dentro de una muestra, tales como testigos de geometría similar (forma y tamaño de la sección transversal).

El procedimiento mejorado para estimar la densidad y el número atómico efectivo de una muestra de objeto diana puede comprender las siguientes etapas (las etapas I y II pueden realizarse en cualquier orden):

10

I. Calcular una relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo de la siguiente manera:

i. Adquirir un conjunto de al menos cinco objetos con densidad conocida. Al menos dos de estos objetos conocidos coinciden con la geometría de barrido (tamaño del objeto diana) y se designan como los objetos de referencia y tienen densidades y composición química diferentes. Al menos tres de los cinco objetos se designan como objetos de calibración, y son generalmente homogéneos y están hechos de materiales con densidades y números atómicos efectivos conocidos y diferentes. Los objetos de calibración deben ser al menos tan largos como los objetos de referencia y los objetos diana de modo que los objetos de calibración estén siempre en el campo de los rayos X cuando el objeto diana o los objetos de referencia estén en el campo de los rayos X. Los objetos de referencia, tal como se utilizan en este documento, pueden referirse a testigos enteros, fragmentos de testigos enteros, u objetos fabricados con este fin. Los valores de densidad y número atómico efectivo de los objetos de referencia deberían abarcar el intervalo esperado de densidades y números atómicos efectivos en el objeto diana bajo investigación.

25 ii. Calcular la densidad sin corregir, ρ_v^R y el número atómico efectivo, Z_v^R , para los objetos de referencia de la siguiente manera.

a. Se forma la imagen simultáneamente de los objetos de referencia y los objetos de calibración en un escáner de TC por rayos X, tal como un modelo de escáner CereTom GEO número NL3100, un modelo de escáner CereTom OTO número NL3100, o un escáner de TC por rayos similares.

b. Registrar el valor de TC alto, CTH_v^R , y el valor de TC bajo, CTL_v^R , para cada vóxel en los objetos de referencia. En el caso de testigos, el eje del testigo está alineado con el eje Z de la imagen (véase la figura 1).

c. Registrar el valor de TC alto, CTH, y el valor de TC bajo, CTL, para cada vóxel de cada uno de los objetos de calibración, CTH_v^C y CTL_v^C , y calcular la media de los mismos por todos los vóxeles en cada plano X-Y de cada uno de los objetos de calibración, CTH_{X-Y}^C y CTL_{X-Y}^C .

d. Utilizar la densidad aparente conocida, ρ_0^C , y el número atómico efectivo, Z_0^C , de al menos tres de los objetos de calibración y sus valores de TC respectivos, CTH_{X-Y}^C y CTL_{X-Y}^C , para resolver el sistema de ecuaciones (8,9)

$$\rho_0^C = A * CTH_{X-Y}^C + B * CTL_{X-Y}^C + C \quad (8)$$

40

$$\rho_0^C (Z_0^C)^\alpha = D * CTH_{X-Y}^C + E * CTL_{X-Y}^C + F \quad (9)$$

para los coeficientes A, B, C, D, E, F. El valor del exponente α puede ser 2,98, 3,6, 3,8, 4,0 u otros valores. Para muestras de roca se prefiere un valor de $\alpha = 3,8$. Si el sistema de ecuaciones está sobreespecificado, puede utilizarse un procedimiento de mínimos cuadrados u otro procedimiento para determinar los mejores valores o valores óptimos de los coeficientes A, B, C, D, E, F.

e. Utilizando los valores CTH_v^R y CTL_v^R a partir de los objetos de referencia y los coeficientes (A, B, C, D, E, F) a partir de la etapa I-ii-d anterior, calcular la densidad y el número atómico efectivo de los objetos de referencia para cada vóxel en los objetos de referencia, ρ_v^R y Z_v^R , a partir de las ecuaciones (10,11)

50

$$\rho_v^R = A * CTH_v^R + B * CTL_v^R + C \quad (10)$$

$$\rho_v^R (Z_v^R)^a = D * CTH_v^R + E * CTL_v^R + F \quad (11).$$

iii. Para cada objeto de referencia, n , promediar los valores de ρ_v^R y Z_v^R . Se calculan las medias, ρ_{avg}^R y Z_{avg}^R . El promediado puede realizarse por todo el volumen del objeto de referencia, o por una porción seleccionada del mismo, libre de los efectos de frontera del barrido. El procedimiento preferido es promediar los valores de TC para cada rebanada en el objeto de referencia, n , y después calcular la densidad aparente y el número atómico efectivo para cada rebanada directamente a partir de los valores medios de TC, y después promediar la densidad y el número atómico efectivo de las rebanadas.

10 iv. Para cada objeto de referencia, n , medir su masa y volumen y calcular la densidad aparente media medida, ρ_{\square}^R , como una relación de la masa respecto al volumen.

v. Para cada objeto de referencia, n , calcular el error absoluto en la densidad, δ . Y el error relativo en la densidad), ε , a partir de

15

$$\delta = \rho_{avg}^R - \rho_{\square}^R \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_{avg}^R - \rho_{\square}^R}{\rho_{\square}^R} \quad (13).$$

20 vi. Determinar una relación funcional entre ε y el número atómico efectivo, Z , resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones (14) para a y b

$$\varepsilon(1) = a * Z_{avg}^R(1) + b \quad (14a)$$

25

$$\varepsilon(2) = a * Z_{avg}^R(2) + b \quad (14b)$$

$$\varepsilon(n) = a * Z_{avg}^R(n) + b \quad (14c)$$

donde $\varepsilon(n)$ = error relativo de la densidad para el objeto de referencia n ,

30

$Z_{avg}^R(n)$ = número atómico efectivo medio calculado para el objeto de referencia n , a y b son constantes.

Si el sistema de ecuaciones (14) está sobreespecificado, puede utilizarse un procedimiento de mínimos cuadrados u otro procedimiento para determinar los mejores valores o valores óptimos de los coeficientes a y b .

35

vii. Determinar una relación funcional entre δ y el número atómico efectivo, Z , resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones (15) para a y b

$$\delta(1) = c * Z_{avg}^R(1) + d \quad (15a)$$

40

$$\delta(2) = c * Z_{avg}^R(2) + d \quad (15b)$$

$$\delta(n) = c * Z_{avg}^R(n) + d \quad (15c)$$

45 donde $\delta(n)$ = error relativo de la densidad para el objeto de referencia n ,

$Z_{avg}^R(n)$ = número atómico efectivo medio calculado para el objeto de referencia n , a y b son constantes.

Si el sistema de ecuaciones (15) está sobreespecificado, puede utilizarse un procedimiento de mínimos cuadrados u otro procedimiento para determinar los mejores valores o valores óptimos de los coeficientes c y d .

50

II. Calcular la densidad sin corregir, ρ_C^T , y el número atómico efectivo, Z^T , para el objeto diana de la siguiente manera:

5 i. Se forma la imagen simultáneamente del objeto diana y los objetos de calibración en un escáner de TC por rayos X, tal como un modelo de barrido CereTom™ GEO número NL3100, un modelo de barrido CereTom™ OTO número NL3100, o un escáner de TC por rayos similares utilizando la misma disposición geométrica de objetos que en la etapa I.ii.a anterior. Los objetos de calibración utilizados aquí son los mismos objetos de calibración que se utilizan en I-i anterior. En el caso de testigos, el eje del testigo está alineado con el eje Z de la imagen (véase la figura 1).

10

ii. Registrar el valor de TC alto, CTH_V^T , y el valor de TC bajo, CTL_V^T , para cada vóxel en el objeto diana. En el caso de testigos, el eje del testigo está alineado con el eje Z de la imagen (véase la figura 1).

15 iii. Registrar el valor de TC alto, CTH_X^C , y el valor de TC bajo, CTL_X^C , para cada vóxel de cada uno de los objetos de calibración y calcular su media por todos los vóxeles en cada plano X-Y de cada uno de los objetos de calibración, CTH_{X-Y}^C y CTL_{X-Y}^C .

iv. Utilizar la densidad aparente conocida, ρ_G^C , y el número atómico efectivo, Z_G^C , de los objetos de calibración y los valores de TC CTH_{X-Y}^C y CTL_{X-Y}^C para resolver el sistema de ecuaciones (16, 17) en cada plano X-Y del barrido:

20

$$\rho_G^C = G * CTH_{X-Y}^C + H * CTL_{X-Y}^C + J \quad (16)$$

$$\rho_G^C (Z_G^C)^\alpha = K * CTH_{X-Y}^C + L * CTL_{X-Y}^C + M \quad (17)$$

25 para los coeficientes G, H, J, K, L, M. Si el sistema de ecuaciones está sobreespecificado, puede utilizarse un procedimiento de mínimos cuadrados u otro procedimiento para determinar los mejores valores o valores óptimos de los coeficientes G, H, J, K, L, M.

v. Utilizar los valores de TC a partir del objeto diana, CTH_V^T y CTL_V^T , y los coeficientes (G, H, J, K, L, M) a partir de la etapa II-iv anterior, para calcular la densidad del objeto diana, ρ_V^T , y el número atómico efectivo, Z_V^T , para cada vóxel en el objeto diana, a partir de las ecuaciones (18, 19):

30

$$\rho_V^T = G * CTH_V^T + H * CTL_V^T + J \quad (18)$$

35

$$\rho_V^T (Z_V^T)^\alpha = D * CTH_V^T + E * CTL_V^T + F \quad (19).$$

III. Para cada vóxel en el objeto diana, calcular el error relativo en la densidad, ε_V^T , a partir de la ecuación (20)

40

$$\varepsilon_V^T = a * Z_V^T + b \quad (20)$$

donde a y b son coeficientes calculados a partir de la etapa I-vi anterior.

IV. Para cada vóxel en el objeto diana, calcular el error absoluto en la densidad, δ_V^T , a partir de la ecuación (21)

45

$$\delta_V^T = c * Z_V^T + d \quad (21)$$

donde c y d son coeficientes calculados a partir de la etapa I-vii anterior.

V. Calcular los valores de densidad aparente corregidos, $\rho_v^{T\epsilon}$, aplicando los factores de corrección de error relativo, ϵ_v^T , a los valores de densidad calculados, ρ_v^T , utilizando la ecuación (22):

$$\rho_v^{T\epsilon} = \frac{\rho_v^T}{1 + \epsilon_v^T} \quad (22).$$

5

VI. Calcular los valores de densidad aparente corregidos, $\rho_v^{T\delta}$, aplicando los factores de corrección de error absoluto, δ_v^T , a los valores de densidad calculados, ρ_v^T , utilizando la ecuación (23):

$$\rho_v^{T\delta} = \rho_v^T - \delta_v^T \quad (23).$$

10

VII. Puede utilizarse o bien $\rho_v^{T\epsilon}$ o bien $\rho_v^{T\delta}$ como una estimación mejorada de la densidad aparente basándose en la elección del modelo que ofrece el error medio mínimo en la densidad aparente.

VIII. Opcionalmente, puede promediarse $\rho_v^{T\epsilon}$ o bien $\rho_v^{T\delta}$ por los vóxeles en cada plano X-Y del objeto diana para producir una diagráfia de densidad aparente.

IX. Opcionalmente, puede promediarse Z_v^T por los vóxeles en cada plano X-Y del objeto diana para producir una diagráfia de número atómico efectivo.

X. Opcionalmente, puede promediarse o bien $\rho_v^{T\epsilon}$ o bien $\rho_v^{T\delta}$ por todos los vóxeles en el objeto diana entero para producir una densidad aparente media para el objeto diana entero.

XI. Opcionalmente, pueden promediarse ambos $\rho_v^{T\epsilon}$ o $\rho_v^{T\delta}$ utilizando medias simples o ponderadas para producir diagráfias de densidad o valores de densidad aparente media.

25

XII. Opcionalmente, calcular la desviación típica, δ_ϵ , de las diferencias entre la densidad aparente media calculada corregida utilizando corrección de error relativo y la densidad aparente media medida físicamente, $\rho_{avg}^{R\epsilon} - \rho_{\bullet}^R$, para cada objeto de referencia. Calcular la desviación típica, σ_δ , de las diferencias entre la densidad aparente calculada corregida media utilizando corrección de error absoluto y la densidad aparente medida físicamente media,

$\rho_{avg}^{R\delta} - \rho_{\bullet}^R$, para cada objeto de referencia. El procedimiento de corrección, absoluto o relativo, con la desviación típica más baja, σ_ϵ o σ_δ , se utiliza para estimar la densidad aparente corregida del objeto diana.

Existen varios procedimientos opcionales que pueden aplicarse para calcular la densidad aparente corregida media y el número atómico efectivo medio para cada rebanada en un objeto diana (testigo) o para el objeto diana entero (testigo). El promediado puede realizarse al nivel de los valores de TC, la densidad aparente sin corregir o la densidad corregida para estimar la densidad aparente corregida media. Igualmente, el promediado puede realizarse al nivel de los valores de TC o el número atómico efectivo para estimar el número atómico efectivo medio. La figura 8 muestra estas opciones en forma de diagrama.

La presente invención se clarificará más mediante los siguientes ejemplos, que están pensados para que sean ejemplares de la presente invención.

EJEMPLOS

Las figuras 5 y 6a-b muestran los resultados de la aplicación del procedimiento de la presente invención a los mismos datos tal como se muestra en las figuras 2 y 3a-b. No sólo el error de densidad es pequeño (no superando nunca el 2 %), las dos densidades ahora se correlacionan muy bien, con un coeficiente de correlación de 0,87. Las tendencias de densidad/número atómico efectivo ahora también coinciden con las expectativas basadas en la física de rocas.

50

La figura 4 es un gráfico que muestra una validación de número atómico efectivo (Zeff) que muestra una comparación entre el número atómico efectivo obtenido de la mineralogía («COREHD») de los diversos ejemplos de muestras de arenisca, caliza, y roca dolomita indicados en la Tabla 1 y el número atómico efectivo de las mismas muestras calculado con la estrategia de doble energía («XRD»). Los valores del número atómico efectivo que se obtuvieron o calcularon de estas maneras respectivas están indicados en la Tabla 1. En la figura 4, la línea de identidad es la línea continua situada entre la línea del +4 % que se extiende por encima de ella, y la línea del -4 % que se extiende por debajo de ella.

Tabla 1

Material	Zeff procedente de la composición mineral (COREHD)	Zeff procedente de mediciones de doble energía (XRD)
Arenisca de Berea beige	11,8	11,8
Arenisca de Crab Orchard	11,9	11,8
Caliza rosa del desierto	15,7	15,8
Caliza blanca Edwards	15,7	15,6
Arenisca de Idaho	12,5	12,7
Dolomita silúrica	13,7	13,1
Arenisca de Scioto	12,7	12,3
Líneas de comparación	0	18
	0	18,72
	0	17,28

10

Los solicitantes incorporan específicamente el contenido entero de toda la bibliografía citada en esta descripción. Además, cuando una cantidad, concentración, u otro valor o parámetro se da como un intervalo, intervalo preferido, o una lista de valores preferibles superiores y valores preferibles inferiores, se entenderá que esto describe específicamente todos los intervalos formados a partir de cualquier par de cualquier límite de intervalo superior o valor preferido y cualquier límite de intervalo inferior o valor preferido, independientemente de si los intervalos se describen por separado. Cuando en este documento se enumera un intervalo de valores numéricos, a menos que se indique de otro modo, se pretende que el intervalo incluya los puntos extremos del mismo, y todos los valores enteros y fracciones dentro del intervalo. No se pretende que el alcance de la invención esté limitado a los valores específicos enumerados cuando se define un intervalo.

20

Otras realizaciones de la invención serán evidentes para los expertos en la materia a partir de la consideración de la presente memoria descriptiva y de la práctica de la presente invención descrita en este documento. Se pretende que la presente memoria descriptiva y los ejemplos se consideren meramente ejemplares, y el alcance verdadero de la invención está indicado por las siguientes reivindicaciones y equivalentes de las mismas.

25

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para estimar la densidad aparente de al menos un objeto diana que comprende:
- 5 i. realizar un barrido de dos o más objetos de referencia con densidad aparente conocida y tres o más objetos de calibración con densidad aparente y número atómico efectivo conocidos,
ii. obtener una relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo utilizando los valores de barrido de los objetos de referencia y los objetos de calibración,
iii. realizar un barrido del objeto diana y los objetos de calibración,
10 iv. obtener la densidad sin corregir y el número atómico efectivo para el objeto diana,
v. obtener correcciones de densidad aparente utilizando la relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo de los objetos de referencia, y el número atómico efectivo para el objeto diana, y
vi. obtener la densidad aparente corregida utilizando las correcciones de densidad aparente, donde las etapas i. y iii. pueden realizarse en cualquier orden.
- 15 2. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde el objeto diana es un cuerpo poroso, una muestra de roca o un testigo de pozo.
3. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dicho barrido es un barrido de TC por
20 rayos X de doble energía.
4. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos dos o más objetos de referencia son muestras de roca, muestras de testigos de pozos, muestras de testigos parciales de pozos, u otros objetos que tienen una densidad aparente conocida.
- 25 5. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos tres o más objetos de calibración tienen un número atómico efectivo y/o una densidad aparente diferentes unos de otros.
6. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos objetos de calibración están
30 situados adyacentes a los objetos de referencia y/o al objeto diana.
7. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos objetos de referencia y dicho objeto diana son escaneados con el mismo barrido o donde dichos uno o más objetos de referencia y dicho objeto diana son escaneados por separado.
- 35 8. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos objetos de calibración tienen suficientes vóxeles en cada sección transversal de cada objeto de calibración para un cálculo eficiente de la media de los valores escaneados.
- 40 9. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos objetos de calibración son circulares o semicirculares.
10. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde cada objeto de calibración varía de forma y/o tamaño uno de otro o donde dichos objetos de calibración tienen un tamaño y forma uniformes unos con respecto a otros.
- 45 11. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dichos objetos de calibración tienen una longitud suficiente de modo que cada objeto de calibración siempre forma parte de cualquier barrido de dichos objetos de referencia o dicho objeto diana.
- 50 12. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde cada uno de dichos objetos de calibración evita elementos que tienen una relación de peso atómico a número atómico superior a 2,1.
13. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde cada uno de dichos objetos de calibración
55 es homogéneo a un nivel de resolución de dicho barrido.
14. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde los objetos de referencia tienen una sección transversal de tamaño y forma igual o similar respecto a dicho objeto diana.
- 60 15. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dicha densidad sin corregir y/o dicho

número atómico efectivo están basados en una media por rebanada de dicho barrido del objeto diana.

16. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde dicha densidad sin corregir y/o dicho número atómico efectivo están basados en una media del barrido entero del objeto diana.

5

17. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde la obtención de una relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo utilizando los valores de barrido de los objetos de referencia y los objetos de calibración comprende

- 10 i. escanear los objetos de referencia y los objetos de calibración en un escáner de TC por rayos X, y
ii. registrar los valores de TC alto y bajo a partir de los barridos de TC por rayos X, y
iii. calcular la media de los valores de TC alto y bajo en cada plano X-Y de los objetos de referencia y los objetos de calibración, y
iv. utilizar la densidad aparente y el número atómico efectivo conocidos de los objetos de calibración y sus valores
15 de TC respectivos para calcular una relación funcional entre el error de densidad aparente y el número atómico efectivo.

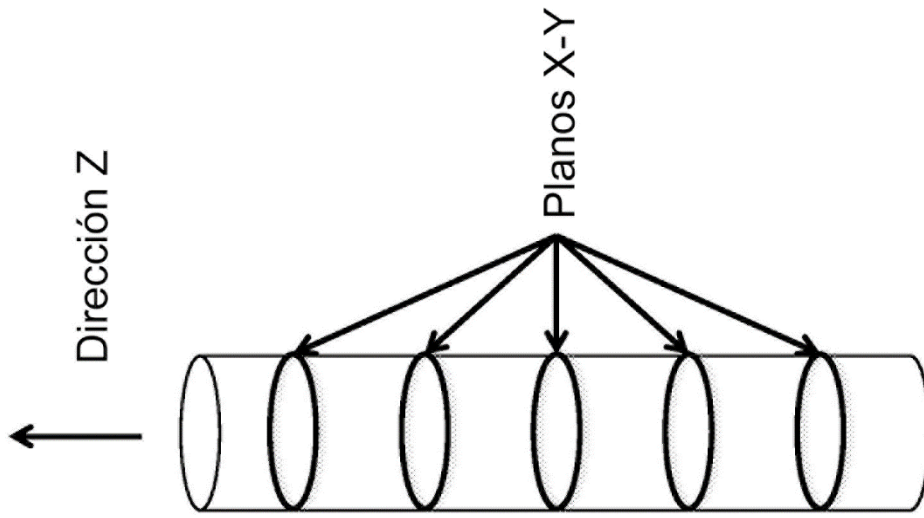


Figura 1

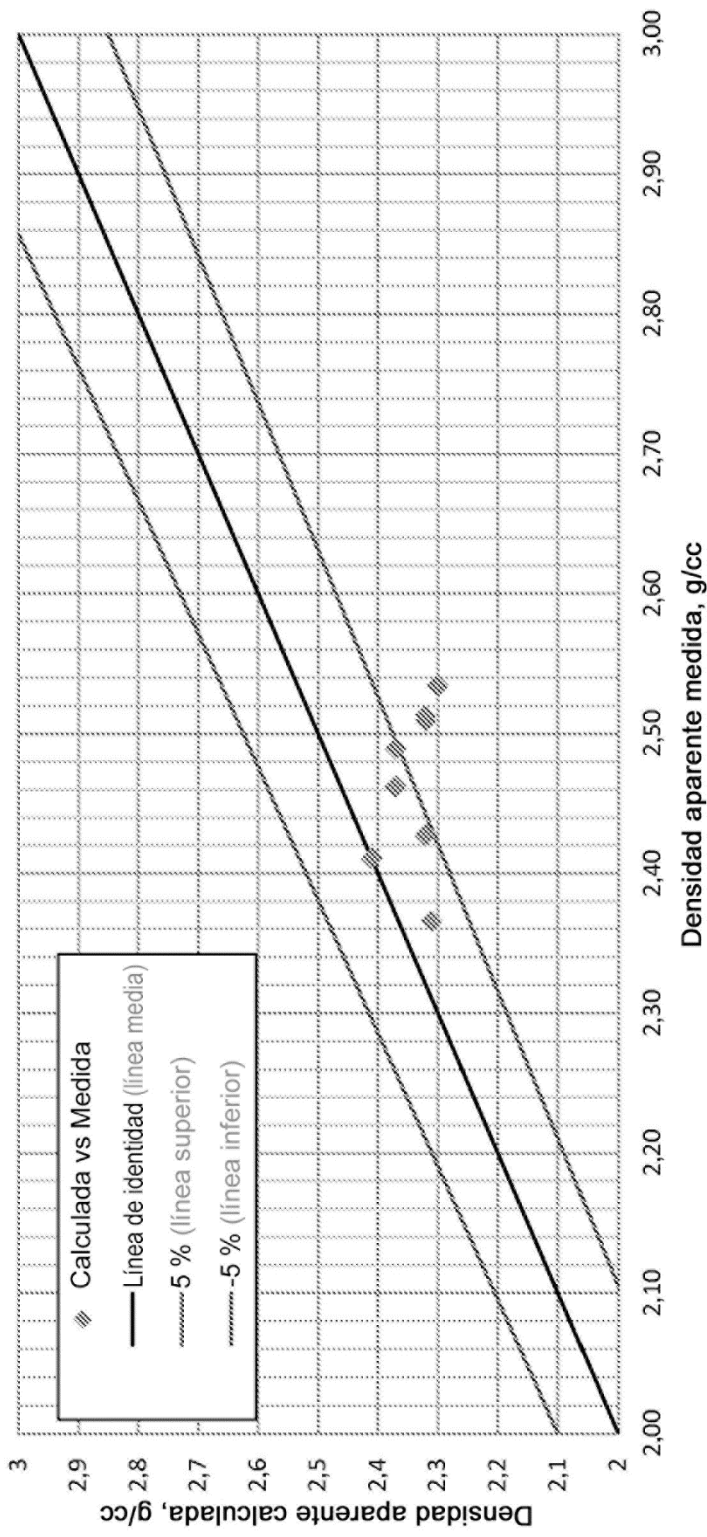


Figura 2

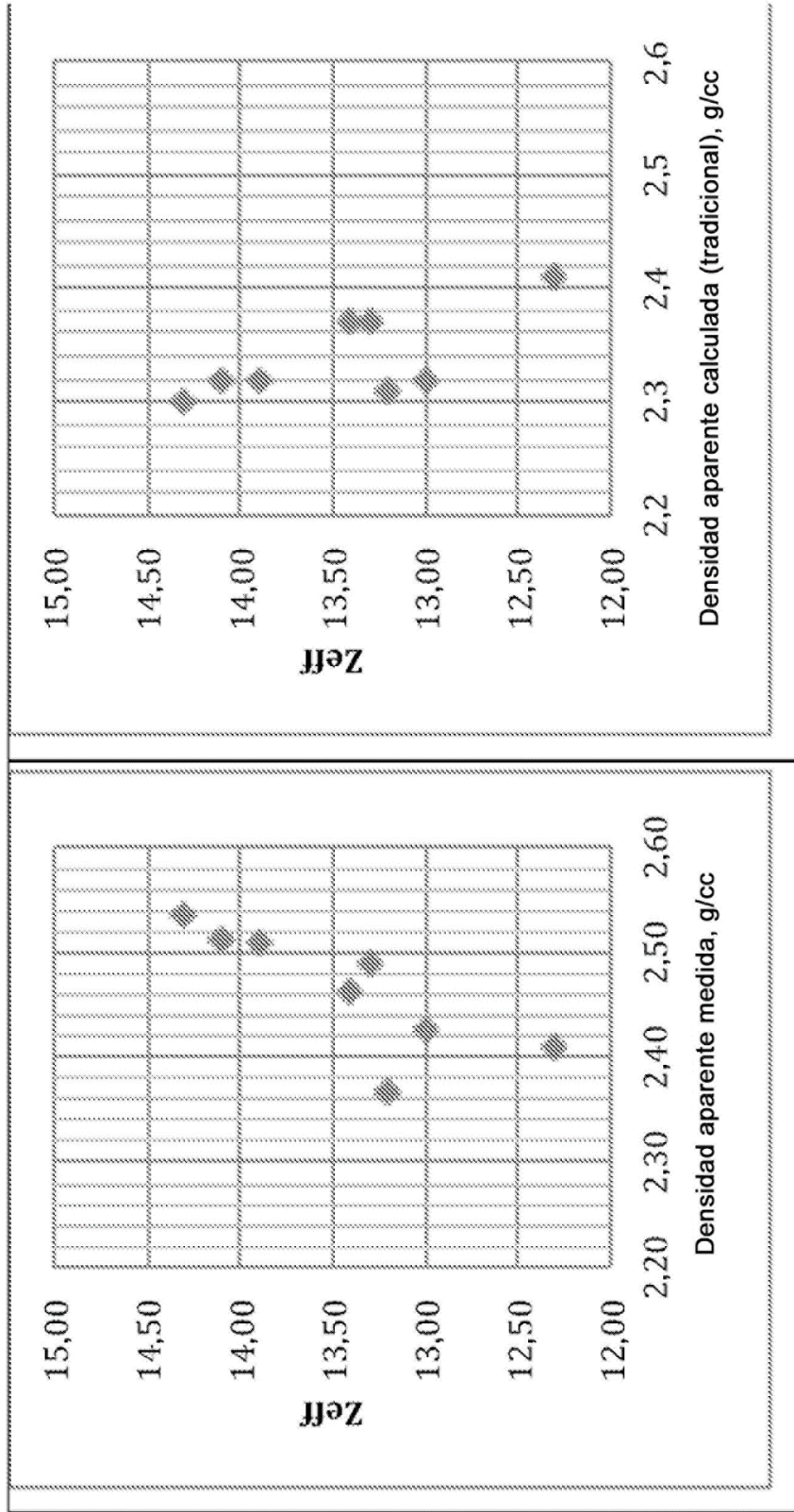


Figura 3b

Figura 3a

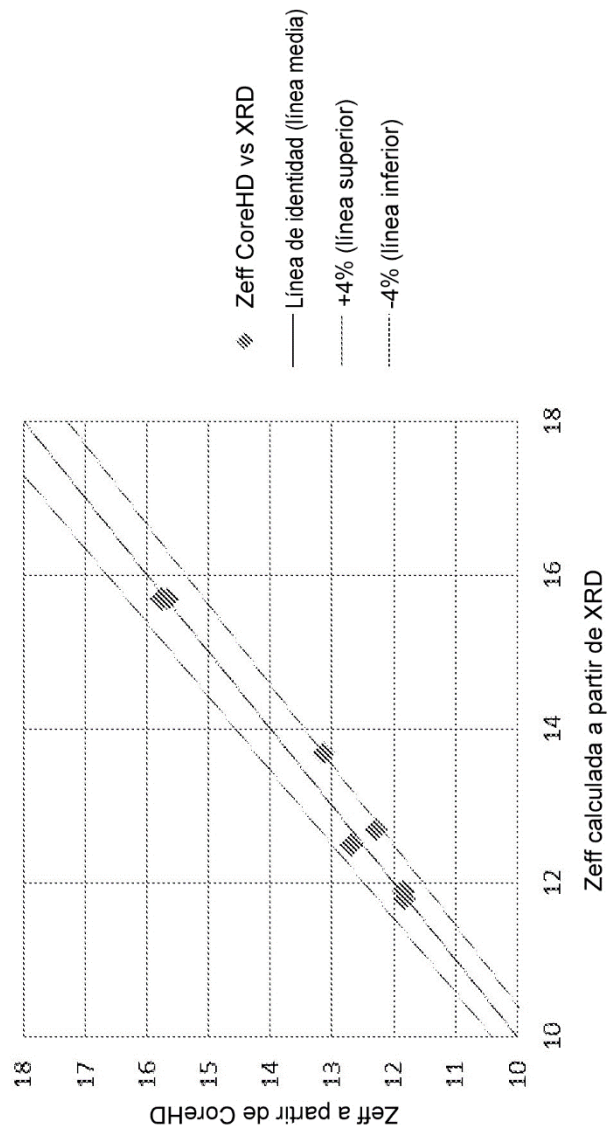


Figura 4

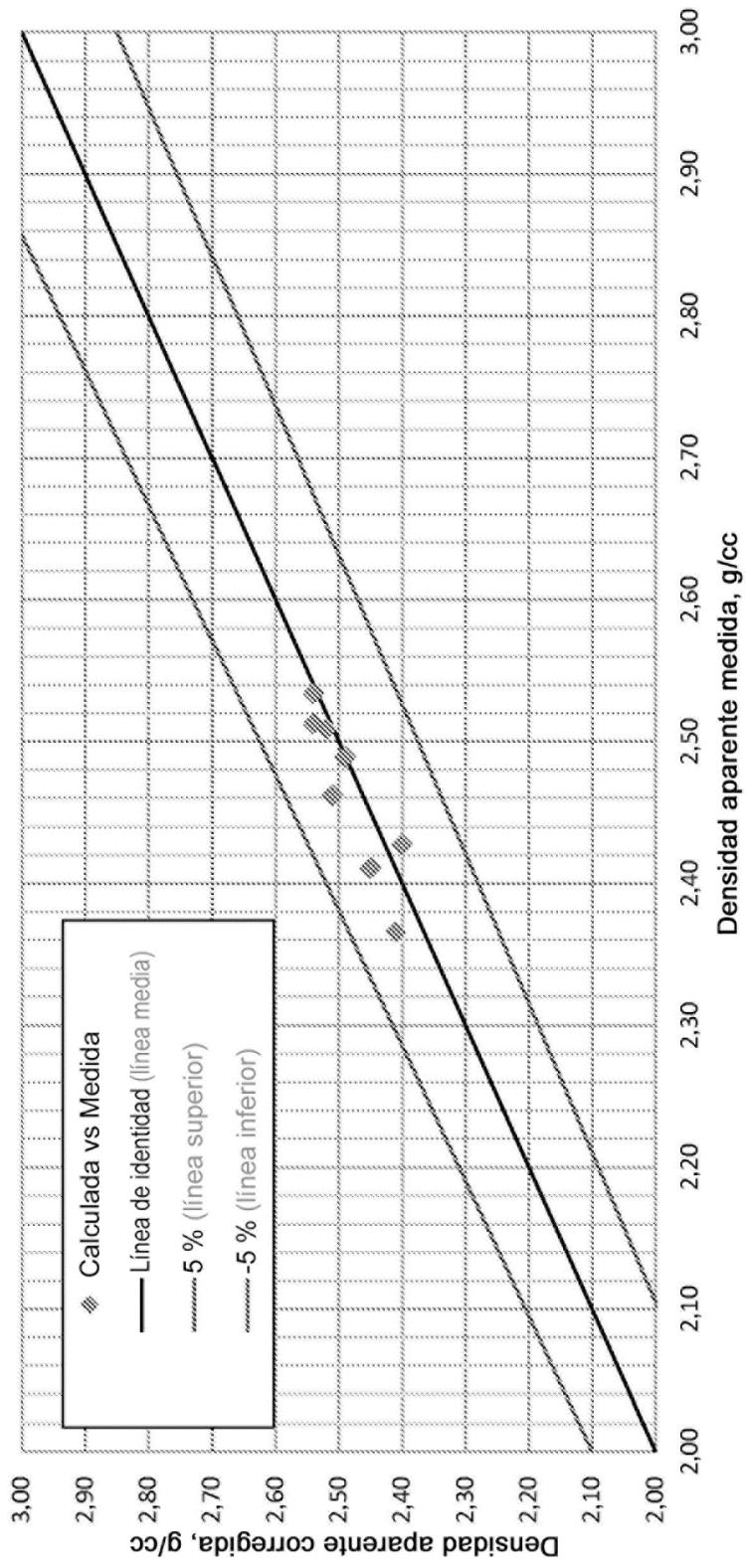


Figura 5

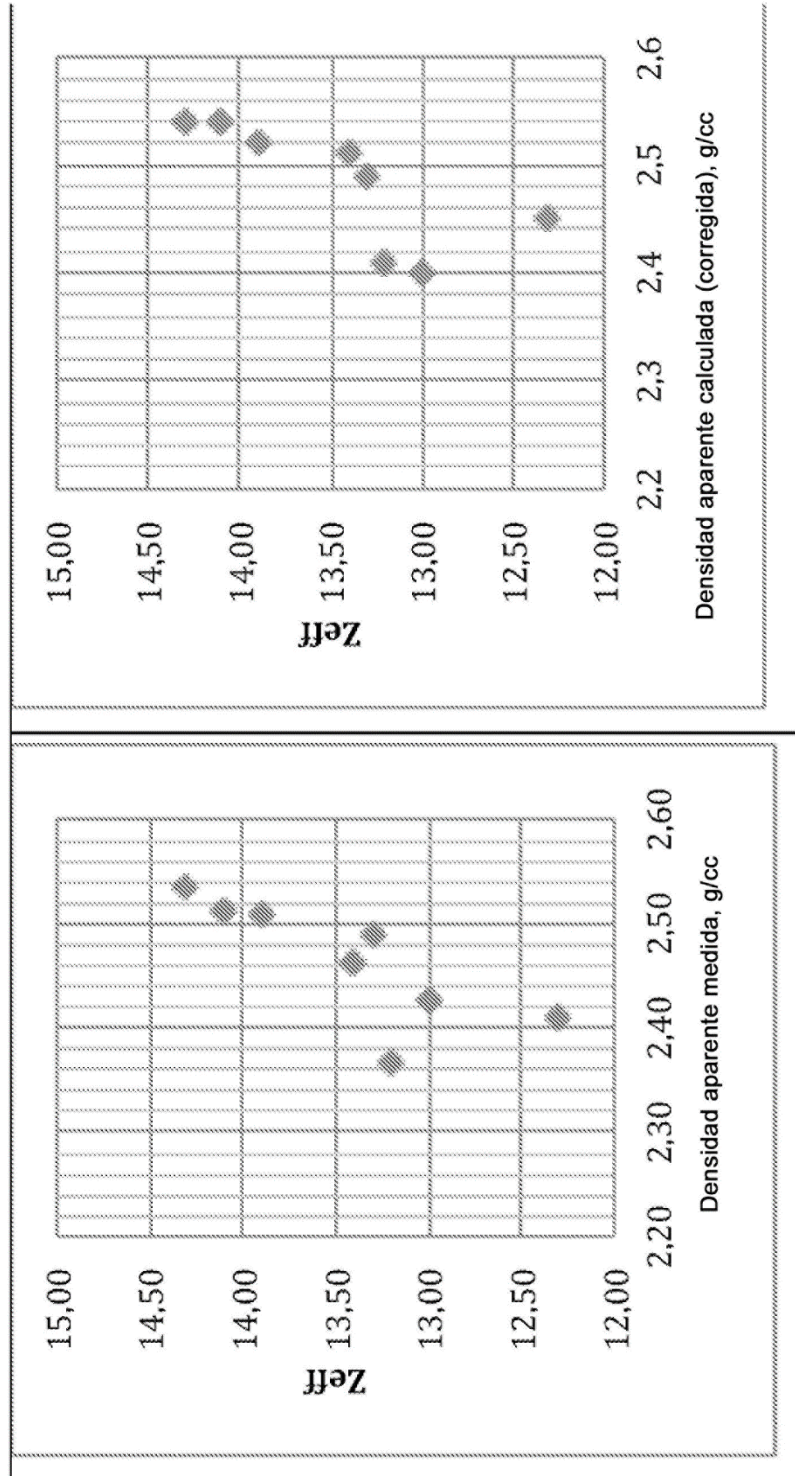


Figura 6a

Figura 6b

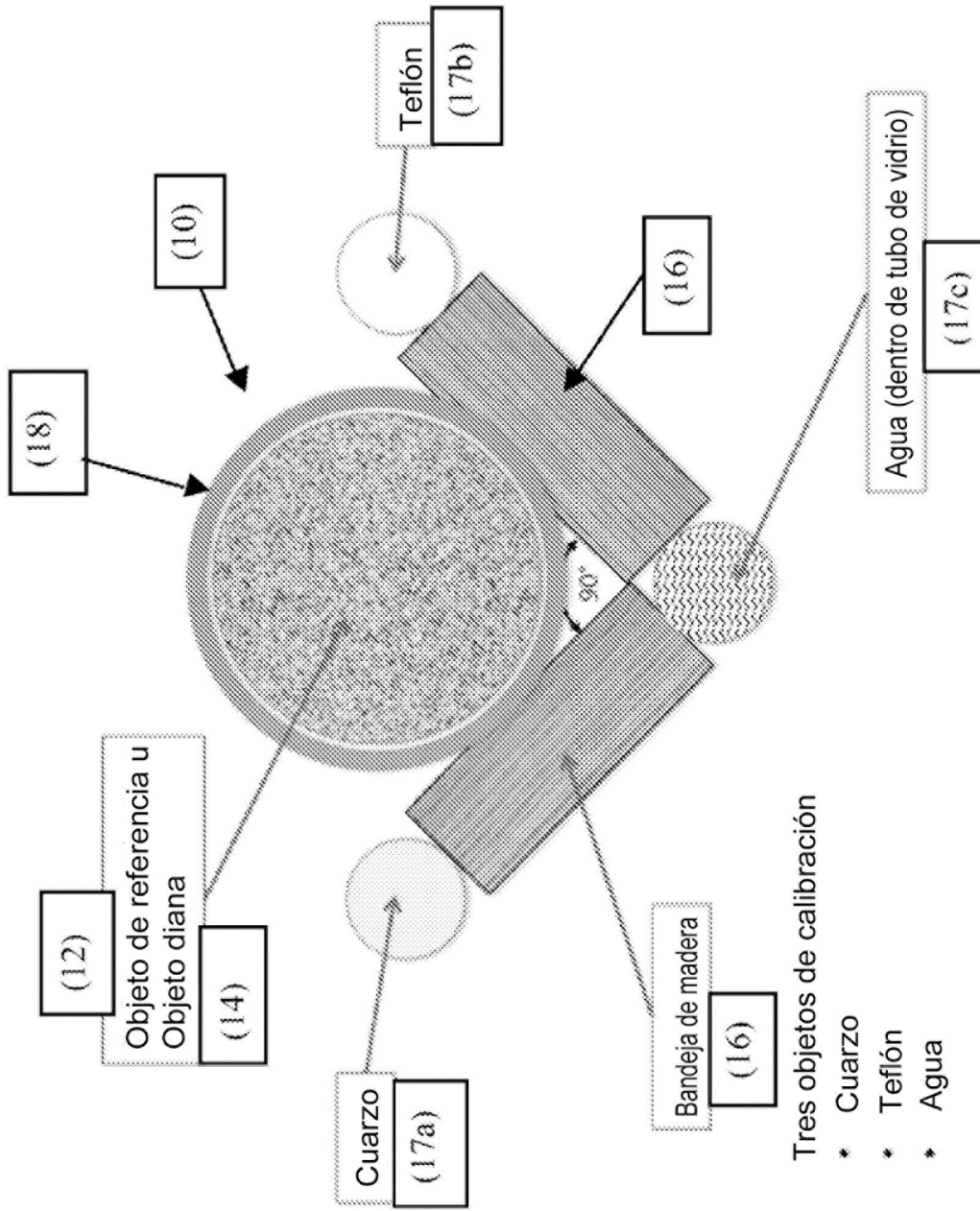


Figura 7

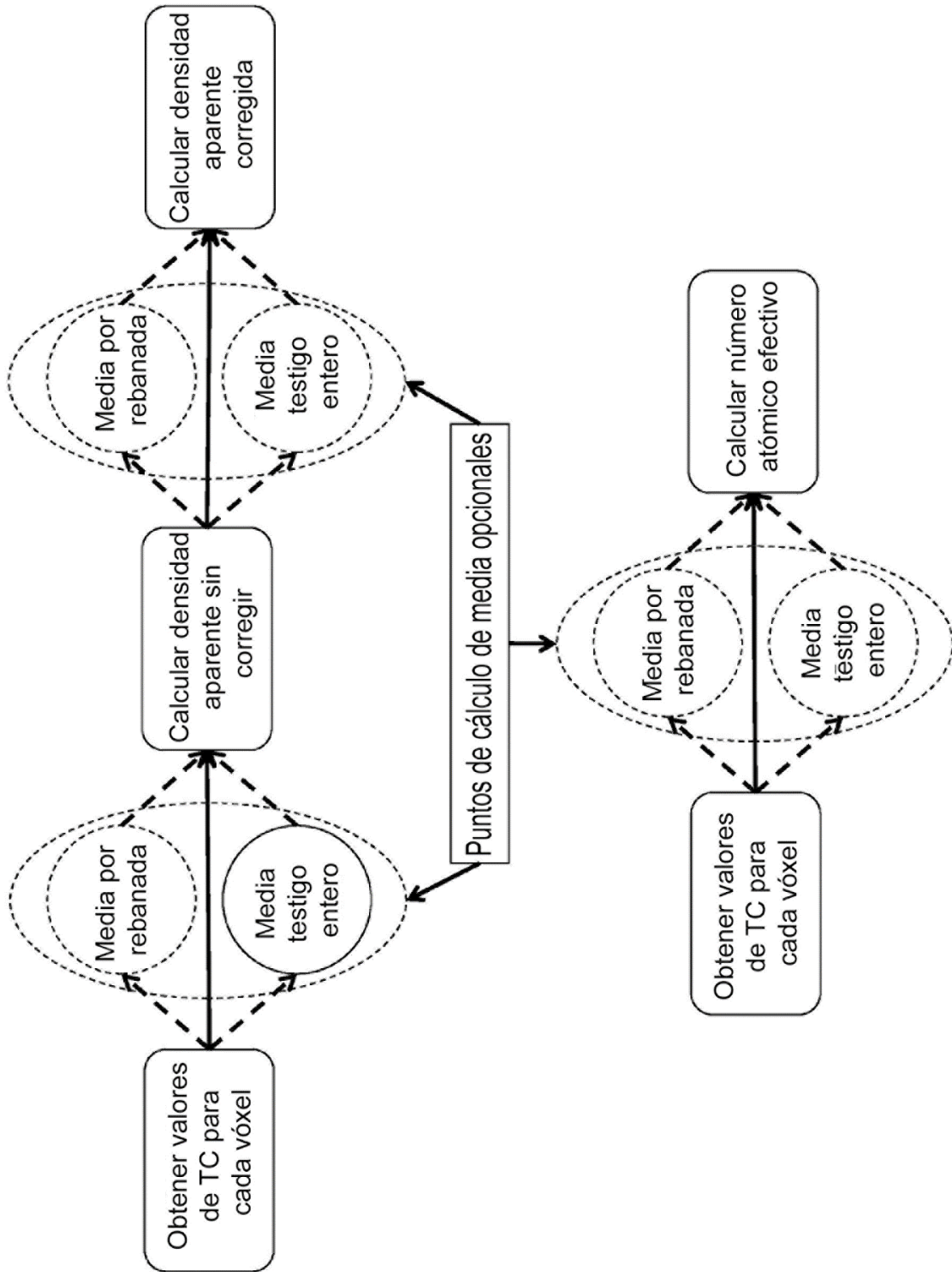


Figura 8