

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 847 600**

51 Int. Cl.:

**G01V 9/00** (2006.01)

**G01V 11/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.11.2009 PCT/US2009/064512**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2010 WO10071721**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.11.2009 E 09833792 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.12.2020 EP 2376955**

54 Título: **Transporte de sedimentos por flujos turbulentos completamente desarrollados**

30 Prioridad:

**18.12.2008 US 138895 P**

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

**03.08.2021**

73 Titular/es:

**EXXONMOBIL UPSTREAM RESEARCH  
COMPANY (100.0%)  
22777 Springwoods Village Parkway  
Spring, TX 77389, US**

72 Inventor/es:

**SUN, TAO;  
LI, DACHANG y  
HOYAL, DAVID**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 847 600 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**

Transporte de sedimentos por flujos turbulentos completamente desarrollados

Campo de la invención

5 La invención se refiere, generalmente, a cualquier campo que implique el transporte de sedimentos por flujos turbulentos completamente desarrollados, tales como ingeniería civil y ambiental, ingeniería costera y marina y las industrias del petróleo y el gas. Específicamente, la invención se refiere a métodos para analizar la erosión, el transporte y la deposición de sedimentos por flujos turbulentos completamente desarrollados.

Antecedentes de la invención

10 Esta sección está destinada a introducir diversos aspectos de la técnica, que pueden estar asociados con realizaciones de la invención. Al final de esta sección se proporciona una lista de referencias y se hará referencia a la misma en lo sucesivo. Se considera que esta discusión, incluidas las referencias, ayudará a proporcionar un marco para facilitar una mejor comprensión de aspectos particulares de la invención. Por consiguiente, esta sección debe leerse en este sentido, y no necesariamente como admisiones de la técnica anterior.

15 Los modelos informáticos de erosión, transporte y deposición de sedimentos tanto por flujo de agua como por corriente de turbidez son herramientas importantes en una amplia gama de industrias ambientales, de ingeniería y energéticas. Estos modelos son necesarios para diseñar muelles de puentes, canales de dragado y puertos, y para proteger playas y humedales. Recientemente, estos modelos también se han aplicado para construir modelos geológicos para la exploración, el desarrollo y la producción de fuentes de energía en las industrias del petróleo y el gas.

20 Un modelo geológico es una representación digital de la geometría interna detallada y las propiedades rocosas de un volumen terrestre subsuperficial, tal como un yacimiento de petróleo o una cuenca llena de sedimentos. En la industria del petróleo y el gas, los modelos geológicos proporcionan insumos geológicos a simulaciones de rendimiento de yacimientos que se usan para seleccionar ubicaciones para nuevos pozos, estimar reservas de hidrocarburos y planificar estrategias de desarrollo de yacimientos. La distribución espacial de la permeabilidad es un parámetro clave en la caracterización del rendimiento del yacimiento y, junto con otras propiedades rocosas y de fluido, determina la capacidad de producción del yacimiento.

25 Las distribuciones espaciales de permeabilidad en la mayoría de los yacimientos de petróleo y gas son altamente heterogéneas. Una de las principales causas de la heterogeneidad es la distribución de diferentes tamaños de grano de sedimentos en diferentes lugares del yacimiento. Esto se debe a que la mayoría de los yacimientos clásticos se formaron por la deposición de los sedimentos en antiguos sistemas de deposición fluviales, deltaicos y de aguas profundas. Dado que los granos de sedimentos de diferentes tamaños se erosionan y transportan de manera diferente, se han ido depositando en diferentes lugares en el yacimiento. Por tanto, si la erosión, el transporte y la deposición de los sedimentos puede modelarse con precisión en sistemas de deposición, las heterogeneidades de los yacimientos formadas por estos procesos de deposición también pueden captarse con precisión.

30 Las dos etapas usadas para desarrollar un modelo de erosión, transporte y deposición de sedimentos son: 1) establecer una relación de resuspensión (también conocida como erosión o arrastre) entre granos de sedimentos de diferentes tamaños y flujos de diferente resistencia, y 2) caracterizar la distribución de los sedimentos suspendidos en la dirección vertical de la columna de agua en la que se suspenden los sedimentos. En un modelo de flujo promedio de profundidad de única capa o múltiples capas, la distribución vertical de los sedimentos suspendidos se describe mediante la relación que relaciona la concentración de sedimentos cercanos al lecho con la concentración promedio de profundidad para diferentes tamaños de granos. La segunda etapa es importante porque la deposición de los sedimentos suspendidos desde el flujo hasta el lecho está estrechamente relacionada con la concentración de los sedimentos suspendidos justo encima del lecho. En modelos de flujo promedio de profundidad de única capa o múltiples capas, solo pueden calcularse los valores promedio de capa de la concentración de sedimentos. Estos valores de concentración promedio de capa pueden ser significativamente diferentes de los valores de concentración reales que están justo encima del lecho. Por tanto, la relación que relaciona la concentración promedio de profundidad con la concentración de lecho cercano es una etapa necesaria para calcular con precisión la deposición de los sedimentos y, posteriormente, el modelado del transporte de sedimentos.

35 La relación de resuspensión (erosión) usada de manera más habitual se conoce como la función de resuspensión García-Parker. En esta función, la tasa de resuspensión de sedimentos de intervalo de tamaño de grano *i* en el flujo desde el lecho es

$$\begin{aligned}
 E_i &= E_{si} v_{si} G_i \\
 &= \frac{a_z Z_i^5}{1 + \frac{a_z Z_i^5}{e_m}} v_{si} G_i
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

en donde  $E_{si}$  es la tasa de resuspensión sin dimensiones y está relacionada con la tasa de resuspensión dimensional mediante

$$E_{si} = \frac{E_i}{v_{si} G_i} = \frac{a_z Z_i^5}{1 + \frac{a_z}{e_m} Z_i^5} \quad [2]$$

5 En la ecuación [1],  $G_i$  es el porcentaje volumétrico de los sedimentos de intervalo de tamaño de grano  $i$  en la capa superficial,  $v_{si}$  es la velocidad de sedimentación para un grano de sedimento con un diámetro  $D_i$  en el  $i$ ésimo intervalo de tamaño,  $a_z$  es una constante y, habitualmente, tiene un valor de  $1,3 \times 10^{-7}$ , y  $e_m$  es igual al valor máximo de la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$ . El valor de  $e_m$  establece el límite superior en el valor de la función de resuspensión.

La función  $Z_i$  que se muestra en la ecuación [1] se define como

$$Z_i = \lambda \frac{u^*}{v_{si}} f(R_{pi}) \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^{0,2} \quad [3]$$

10

en la que

$$\lambda = 1 - 0,288 \sigma_\phi \quad [4]$$

15 En las ecuaciones anteriores,  $u^*$  es la velocidad de flujo de cizalladura,  $D_{50}$  es el diámetro del grano de sedimento en el percentil 50 en la distribución, y  $\sigma_\phi$  es la desviación estándar de la distribución del tamaño del grano en las unidades logarítmicas "phi" familiares para los geólogos. El número de partícula de Reynolds  $R_{pi}$  para granos en el  $i$ ésimo intervalo de tamaño se define como

$$R_{pi} = \frac{(RgD_i)^{1/2} D_i}{\nu} \quad [5]$$

en donde  $R$  es el peso específico sumergido de los sedimentos,  $g$  es la constante de aceleración gravitacional y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua.

20 Existen dos formulaciones usadas de manera habitual de la función de Reynolds  $f(R_{pi})$  tal como se usan en la ecuación [3]. La primera es

$$f(R_{pi}) = R_{pi}^{0,6} \quad [6]$$

La segunda forma de la función de Reynolds añade una corrección para partículas con un número pequeño de partículas de Reynolds de la siguiente manera:

$$f(R_{pi}) = \begin{cases} R_{pi}^{0,6} & \text{si } R_{pi} > 2,36 \\ 0,586 R_{pi}^{1,23} & \text{si } R_{pi} \leq 2,36 \end{cases} \quad [7]$$

25

Ambas formas de  $f(R_{pi})$  están en uso. En este documento, la relación de resuspensión definida por las ecuaciones [1], [3] y que usa la forma de  $f(R_{pi})$  en la ecuación [6], se conoce como el modelo de tesis de García. Por consiguiente, la relación de resuspensión que usa la forma de  $f(R_{pi})$  en la ecuación [7] se conoce como modelo de 1993 de García.

Para los sedimentos con un único tamaño de grano, la relación de resuspensión [3] mostrada anteriormente puede

30 simplificarse porque los términos  $\lambda$  y  $\left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^{0,2}$ , caracterizando ambos las interacciones entre partículas de sedimentos de diferentes tamaños de grano, se reducen a 1. Por tanto, la función  $Z_i$  puede declararse como

$$Z_i = \frac{u^*}{v_{si}} f(R_{pi}) \quad [8]$$

La relación de resuspensión que usa la ecuación [8] se usa, a menudo, para estudiar experimentos de canal.

Otro ejemplo de una función de resuspensión que puede usarse es de Akiyama y Fukushima. En esta función de resuspensión, la tasa de resuspensión de sedimentos del intervalo de tamaño de grano  $i$  en el flujo es:

$$E_i = \begin{cases} 0,3v_{si}G_i, & Z_i > Z_m \\ 3 \times 10^{-12} Z_i^{10} \left(1 - \frac{Z_c}{Z_i}\right) v_{si} G_i, & Z_c \leq Z_i \leq Z_m \\ 0, & Z_i < Z_c \end{cases} \quad [9]$$

en donde  $Z_c = 5$  y  $Z_m = 13,2$ . El cálculo de  $Z_i$  es el mismo que se muestra en las ecuaciones [3] u [8].

- 5 Las relaciones de resuspensión mostradas en las ecuaciones [1] y [9] son relaciones de cierre necesarias en los cálculos del transporte de sedimentos en condiciones naturales, que usan cualquier modelo de flujo. Algunos ejemplos de estos modelos de flujo incluyen modelos de flujo promediados en profundidad, modelos de flujo en 2D completos y modelos de flujo en 3D completos. En este caso, los modelos de flujo en 2D y en 3D completos se refieren a modelos en los que las variaciones de las propiedades de flujo y las concentraciones de sedimentos en la dirección vertical son variables de las ecuaciones de flujo predominantes. Muchos modelos de flujo usados en software comercial existente tal como el Fluent o el Flow3D son de esta clase.

15 Otra relación de cierre importante que es necesaria cuando se usan modelos de flujo promediados en profundidad es la relación entre  $r_0$  (que representa la relación entre la profundidad cercana al lecho con respecto a las concentraciones de sedimentos promedio de profundidad) y las condiciones de flujo y sedimento. Cuando el sedimento se transporta por flujo turbulento, la distribución de los sedimentos en la dirección vertical no es uniforme, sino que se forman determinados perfiles de concentración de sedimentos. Por lo general, la concentración de los sedimentos es mayor en la parte inferior del flujo (es decir, más cercana al lecho) que en la parte superior del flujo. Las concentraciones de sedimentos cercanos al lecho se refieren a las concentraciones de sedimentos en el lugar que se encuentra justo encima del lecho. La ubicación real suele tratarse como un parámetro modelo. Los valores habituales oscilan entre una distancia igual al diámetro del grano más grande del lecho, y el 10% de la profundidad de flujo.

20 La expresión usada más habitualmente para  $r_0$  es la constante de aproximación en donde

$$r_0 = const \quad [10]$$

en la que la constante tiene, normalmente, un intervalo de valores entre 1,0 y 2,5. Otra expresión de  $r_0$  es

$$r_0 = 1 + 31,5\mu^{-1,46} \quad [11]$$

25 en la que

$$\mu = \frac{u^*}{v_s} \quad [12]$$

es la relación entre la velocidad de cizalladura  $u^*$  y la velocidad de caída de partícula  $v_s$ . En una mezcla de sedimentos con partículas de múltiples tamaños,  $r_{0i}$  puede sustituirse en las ecuaciones anteriores por  $r_0$ , y  $v_{si}$  por  $v_s$ , correspondiente a granos de sedimentos en el intervalo de tamaño  $i$ , respectivamente. Otras expresiones para  $r_0$  incluyen una forma lineal

$$r_0 = 2,0761 - 0,0108\mu \quad [13]$$

y una forma de ley de potencia sencilla

$$r_0 = 2,2461\mu^{-0,0772} \quad [14]$$

35 De manera similar a las ecuaciones [10] y [11],  $r_{0i}$  se sustituye por  $r_0$  y  $v_{si}$  por  $v_s$  para mezclas de sedimentos de partículas de múltiples tamaños.

Tanto las funciones de resuspensión como las relaciones de concentración de sedimentos cercanos al lecho con respecto a profundidad promedio mostradas en las ecuaciones [1], [9], [10], [11], [13] y [14] se obtuvieron principalmente a partir de experimentos de canal usando mezclas de sedimentos con tamaños de grano medios muy finos y con distribuciones de tamaño de grano estrechas. Aunque estas ecuaciones son adecuadas en tales circunstancias, se observan deficiencias importantes e incoherencias significativas en todas las ecuaciones cuando se aplican en determinadas condiciones del mundo real. Estas deficiencias e incoherencias se examinarán ahora con más detalle.

Dado que la tasa de arrastre sin dimensiones  $E_{si}$  mostrada en la ecuación [2] es una función monotónica de  $Z_i$ , puede elegirse un valor umbral  $Z_i$  para definir el inicio de una suspensión significativa. Según la ecuación [3] u [8],  $Z_i$  es una función de la velocidad de flujo de cizalladura  $u^*$  y el tamaño de grano  $D_i$ . Por tanto, las curvas  $Z_i(u^*, D_i) = Z_i$  pueden dibujarse en una gráfica  $u^* - D$  para indicar la ubicación del inicio de la suspensión significativa en el espacio  $u^* - D$  para cualquier elección de  $Z_i$ .

La figura 1A muestra gráficas 11, 12 y 13 de las curvas  $Z_i(u^*, D_i) = Z_i$  obtenidas usando el modelo de tesis de García y correspondientes a tres elecciones diferentes de  $Z_i$ , a saber, 1, 5 y 10, respectivamente. La figura 1B muestra las curvas 21, 22 y 23 obtenidas usando el modelo de 1993 de García y correspondientes a los mismos valores de  $Z_i$ . Por motivos de comparación, la curva de Shields 14, que describe la velocidad de cizalladura crítica necesaria para el comienzo del movimiento de partículas de tamaño  $D_i$  en el lecho, también se ha representado gráficamente en las figuras 1A y 1B. La curva de Shields fue desarrollada a partir de experimentos de canal y se usa en muchas relaciones de transporte de carga de lecho. Para una comparación adicional, la curva 15 de  $u^* = v_s(D_i)$  también se ha representado gráficamente en las figuras 1A y 1B. La curva 15 muestra cuándo la velocidad de cizalladura tiene el mismo valor que la velocidad de caída de la partícula del tamaño  $D_i$ . En la mayoría de las situaciones, la suspensión significativa no puede producirse cuando la velocidad de flujo de cizalladura  $u^* < v_s(D_i)$ . Por tanto, esta curva proporciona un buen límite inferior para el comienzo de la suspensión.

Como era de esperar, las figuras 1A y 1B muestran que las curvas representadas gráficamente con diferentes valores de  $Z_i = 1$ ,  $Z_i = 5$  y  $Z_i = 10$ , son diferentes. Los valores más grandes de  $Z_i$  implican un umbral más alto para el inicio de la suspensión y, por consiguiente, corresponden a valores umbrales más altos de  $u^*$  para el mismo  $D$ . Un valor usado de manera habitual es  $Z_i = 5$ .

Puede observarse inmediatamente a partir de las figuras 1A y 1B que los resultados para el inicio de una suspensión significativa obtenida usando tanto el modelo de tesis de García como el modelo de 1993 de García son incorrectos para sedimentos de tamaños de grano superiores a aproximadamente 1,5 mm. Específicamente, las curvas predicen que la velocidad de flujo de cizalladura  $u^*$  disminuirá a medida que los tamaños de grano  $D$  aumenten por encima de aproximadamente 1,5 mm. Esto es contrario al conocimiento común de que las partículas más grandes son más pesadas y más difíciles de mover, por lo que es menos probable que se suspendan que las partículas más ligeras. Sin embargo, los resultados mostrados en la figura 1A sugieren incorrectamente que se requiere una mayor velocidad de flujo para suspender una partícula con un diámetro de 1,5 mm que para suspender una partícula con un diámetro de 100 mm.

Una segunda incoherencia de los modelos de resuspensión anteriores es que las curvas para el inicio de suspensión significativa representadas gráficamente en las figuras 1A y 1B caen muy por debajo de la curva  $u^* = v_s$  y la curva de Shields para sedimentos de gran tamaño de grano. Se ha observado que la mayoría de los ríos naturales caracterizados por una carga de sedimento suspendido dominante se representan gráficamente por encima de la curva  $u^* = v_s$ . Los ríos naturales que se representan gráficamente entre la curva  $u^* = v_s$  y la curva de Shields están dominados, principalmente, por carga de lecho, y la suspensión de sedimentos en los mismos no es significativa. Como las curvas 11-13 y 21-23 caen incluso por debajo de la curva de Shields para sedimentos de gran tamaño de grano, los modelos de resuspensión usados para generar las curvas 11-13 y 21-23 no predicen con precisión el comportamiento de sedimentos de gran tamaño de grano.

La misma incoherencia se hace más clara cuando las curvas para el inicio de una suspensión significativa se usan para predecir la velocidad de flujo de cizalladura  $u^*$  para sedimentos con tamaños de grano mayores que, por ejemplo, 4 mm, si se usa la curva 12, 22  $Z_i = 5$  como criterio. En este caso, la curva 12, 22  $Z_i = 5$  cae por debajo de la curva de Shields 14 para todos los sedimentos que tienen  $D > 4$  mm, lo que implica que puede producirse una cantidad significativa de suspensión a un valor de  $u^*$  que es menor que el valor crítico de  $u^*$  para que se produzca cualquier carga de lecho. Una vez más, las funciones conocidas relativas al inicio de una suspensión significativa, tal como se representan gráficamente en las figuras 1A y 1B, son claramente incorrectas.

Las curvas para el inicio de una suspensión significativa correspondiente al modelo de 1993 de García (figura 1B) difieren de las del modelo de tesis de García (figura 1A) porque se ha añadido una corrección para partículas sedimentarias con números pequeños de partículas de Reynolds. Esta corrección mitiga el error en el modelo de tesis de García, en el que las curvas de inicio de suspensión caen por debajo de la curva de Shields para sedimentos muy finos. Por ejemplo, la curva 12 correspondiente a  $Z=5$  en la figura 1A cae por debajo de la curva de Shields 14 cuando el tamaño del grano del sedimento es inferior a aproximadamente 0,05 mm. Aunque la curva 22  $Z=5$  correspondiente en la figura 1B también cae por debajo de la curva de Shields 14 para un tamaño de grano de sedimento muy pequeño, tal cruce se produce cuando el tamaño del grano disminuye a menos de aproximadamente 0,008 mm. Por tanto, a pesar de la mejora realizada por el modelo de 1993 de García con respecto al modelo de tesis de García original, el segmento de cada curva que corresponde a partículas pequeñas sigue siendo convexo, tal como es el caso de la figura 1A. Esta convexidad de las curvas también se manifiesta en las partes de las curvas correspondientes a partículas grandes. La naturaleza convexa de las curvas predice una mejor clasificación cada vez superior de los sedimentos con tamaños de grano medios decrecientes de  $D < 0,07$  mm, lo cual es incoherente con las observaciones de campo. En este contexto, clasificación se refiere a cómo un flujo de fluido deposita sedimentos. Se supone que los sedimentos más grandes, más pesados se depositan antes que los sedimentos más pequeños, más ligeros.

La naturaleza convexa del segmento de número pequeño de partículas de Reynolds de las curvas 11-13, 21-23 también da como resultado una pendiente de casi cero en estas curvas para sedimentos con tamaños de grano de 0,02 mm a 0,07 mm. Esto implica que, para los sedimentos de tamaños de grano único en este rango de tamaño de grano, las tasas de resuspensión de los sedimentos no varían significativamente. En tales condiciones, sin embargo, el modelo de 1993 de García puede predecir una clasificación inversa (es decir, el flujo de fluido deposita sedimentos más pequeños antes que los sedimentos más grandes) si también se tienen en cuenta los términos para las interacciones entre sedimentos de diferentes tamaños de grano mostrados en la ecuación [3]. En la figura 2, la tasa de resuspensión de sedimentos sin dimensión  $E_s$  se representa gráficamente en función de la velocidad de flujo de cizalladura para diferentes tamaños de grano en la mezcla de la siguiente manera: un tamaño de grano de 6,25 micras se muestra por la línea continua más clara 25, un tamaño de grano de 12,5 micras se muestra por la línea de puntos 26, un tamaño de grano de 25 micras se muestra por la línea discontinua 27, un tamaño de grano de 50 micras se muestra por la línea continua más oscura 28, un tamaño de grano de 100 micras se muestra por los círculos representados gráficamente 29, un tamaño de grano de 200 micras se muestra por los cuadrados representados gráficamente 30, un tamaño de grano de 400 micras se muestra por los signos + representados gráficamente 31, y un tamaño de grano de 800 micras se muestra por los triángulos representados gráficamente 32. Las ecuaciones [3] y [7] (es decir, el modelo de 1993 de García) se usan para obtener los resultados mostrados en la figura. De la figura 2 se desprende claramente que la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_s$  disminuye a medida que aumenta el tamaño del grano del sedimento, excepto cuando el tamaño del grano es de 50 micras. Contrariamente a lo que cabría esperar, la tasa de resuspensión sin dimensiones para sedimentos con un tamaño de grano de 50 micras es mayor que la tasa de resuspensión para sedimentos con tamaños de grano más pequeños de 25 micras y de 12,5 micras. Los resultados pronosticados por el modelo de 1993 de García son, por tanto, incorrectos.

De manera similar a las inconsistencias de las funciones de resuspensión existentes descritas anteriormente, las funciones conocidas que expresan la relación entre las concentraciones de sedimentos cercanos al lecho y los valores promedio de profundidad también presentan muchas deficiencias significativas. La figura 3 muestra la relación  $r_0$  entre la concentración de sedimento cercano al lecho y la concentración promedio de profundidad, en función de  $\mu$ , en donde  $\mu = \frac{u^*}{v_s}$ . En la figura se representan esquemáticamente dos conjuntos de datos experimentales, identificados en la figura como el conjunto 34 de datos de García (diamantes) y el conjunto 35 de datos de Graf (círculos). En la figura también se muestran diversas aproximaciones para  $r_0$ , tales como una aproximación 36 constante tal como sugiere la ecuación [10], un ajuste 37 lineal sencillo tal como sugiere la ecuación [13], una aproximación 38 de ley de potencia sencilla tal como sugiere la ecuación [14], y una aproximación 39 calculada a partir de las ecuaciones [11] y [12]. Los valores para  $r_0$  según las curvas 36, 37 y 38 no son buenos ajustes para los datos experimentales 34, 35, especialmente para valores pequeños de  $\mu$  (es decir, menos de 10). Por ejemplo, cuando se aplica  $\mu \rightarrow 0$ , el valor de  $r_0$  es de aproximadamente 2,1 y 3,1 según el ajuste 37 lineal sencillo y la aproximación de ley de potencia sencilla, respectivamente. Obsérvese que  $\mu \rightarrow 0$  corresponde a situaciones en las que hay poca turbulencia en el flujo y los sedimentos obtienen poca elevación para permanecer suspendidos en el flujo. En estas situaciones, la mayoría de los sedimentos se concentrarán en la parte más inferior del flujo. Por tanto, se espera que el valor de  $r_0$  sea significativamente mayor que los números previstos por estas dos aproximaciones.

La aproximación 39 parece ser un mejor ajuste a los datos experimentales 34, 35, pero sigue siendo seriamente deficiente para valores muy pequeños de  $\mu$ . Específicamente, en la aproximación 39  $r_0 \rightarrow \infty$  cuando  $\mu \rightarrow 0$ . Esto no es correcto. Siendo  $C_b$  la concentración de sedimento cercano al lecho y siendo  $C$  la concentración de sedimentos promedio de profundidad. La concentración de sedimento cercano al lecho  $C_b$  se define como la concentración de sedimento medida a una distancia desde el lecho igual a determinada fracción  $\delta$  de la altura de flujo. En el caso limitativo en el que todos los sedimentos están por debajo del nivel de  $\delta h$ , en donde  $h$  es la altura del flujo,  $C_b \delta h < Ch$ .

Por tanto  $r_0 = \frac{C_b}{C} < \frac{1}{\delta}$ . En la práctica, se usa a menudo un valor de 0,05 para  $\delta$ . En ese caso, el límite superior para  $r_0$  es 20.

La relación de resuspensión definida en las ecuaciones [1] y [3] es una función continua con respecto a  $u^*$ . Cuando esta forma de relación de resuspensión se usa junto con ecuaciones de transporte de carga de lecho, que a menudo contienen umbrales de corte basados en tensiones críticas de cizalladura, pueden surgir incoherencias. La figura 4 muestra la comparación del transporte volumétrico por anchura unitaria  $q$  entre el transporte de carga de lecho, representado por la curva 40 y el transporte de carga suspendida, representado por la curva 41. La relación de transporte de carga de lecho usada en el cálculo se toma de la referencia de Ashida citada en el presente documento. La carga suspendida se calcula usando el modelo de 1993 de García proporcionado en las ecuaciones [1], [3], [4], [5] y [7]. El cálculo usó doce intervalos de sedimentos con un tamaño de grano mínimo de 6,25 micras y un tamaño de grano máximo de 1,280 mm y se asumió una distribución logarítmica uniforme. Los resultados mostrados en la figura 4 corresponden a los sedimentos con un tamaño de grano de 1,6 mm. Para la velocidad de flujo de cizalladura  $u^* > 0,35$ , la figura 4 muestra que el transporte de sedimentos fue inicialmente dominado por la carga de lecho. A medida que  $u^*$  aumenta, la carga suspendida se convierte en el componente principal del transporte de sedimentos, tal como se esperaba. También puede observarse en la figura que para  $u^* < 0,29$ , la carga de lecho cae a cero debido a que no se supera la velocidad de flujo de cizalladura crítica. Sin embargo, a diferencia de la carga de lecho, dado que  $E_s$  una función continua de  $u^*$ , la carga suspendida no es cero. Aunque la tasa de transporte de carga suspendida también

debe ser pequeña, los resultados de la figura 4 implican, no obstante, la suspensión de sedimentos de 1,6 mm de tamaño antes de que se produzca cualquier transporte de carga de lecho, lo que no puede ser correcto.

En el presente documento se han expuesto muchos problemas e incoherencias con las teorías existentes de resuspensión de sedimentos en flujos turbulentos. Se necesita un modelo que elimine estos problemas e incoherencias. La presente invención proporciona un modelo de este tipo.

A continuación, puede encontrarse otro material relacionado: la patente estadounidense n.º 70201300; Akiyama, J., y Fukushima, Y. (1986), *Entrainment of noncohesive sediment into suspension*, 3ª Int. Simp. sobre sedimentación fluvial, S. Y. Wang, H. W. Shen y L. Z. Ding, Eds., Univ. de Mississippi, 804-813; García, tesis de doctorado, Universidad de Minnesota, 1989; García y Parker, *Entrainment of bed sediment into suspension*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (4), págs. 414-435, 1991; García y Parker, *Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current*, *Journal of Geophysical Research*, 98 (C3), 4793-4807, 1993; García, M. H. (1999), *Sedimentation and erosion hydraulics*, *Hydraulic design handbook*, L. Mays, ed., McGraw-Hill, Nueva York, 6.1-6.113; Graf, W. H., (1971), *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill Book Co., Inc., Nueva York, Nueva York; Parker, G., Fukushima, Y., y Pantin, H. M. (1986), *Self-accelerating turbidity currents*, *J. Fluid Mech.*, v171, 145-181; Ashida, K. y Michiue, M. (1971), *An investigation of river bed degradation downstream of a dam*, Proc. 14º Congreso de la IAHR. y García, M. H., *Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment*, *Journal of Hydraulic Engineering*, v120, n.º 11, págs. 1240 (1993).

Compendio de la invención

La invención es un método para extraer hidrocarburos a partir de un yacimiento de hidrocarburos según la reivindicación 1. Se define un conjunto de ecuaciones relacionadas con la erosión y la deposición de sedimentos. Al menos una de las ecuaciones del conjunto de ecuaciones tiene un valor de parámetro ajustable para adaptar un resultado del conjunto de ecuaciones a datos que representan la erosión de sedimentos y el comportamiento de deposición observados, de modo que el conjunto de ecuaciones modela con precisión la erosión de los sedimentos y el comportamiento de deposición para tamaños de sedimentos a lo largo de un rango entre aproximadamente 10 micras y aproximadamente 10 centímetros. Se establece una distribución de tamaño de grano de una condición inicial de lecho sedimentario. El conjunto de ecuaciones se aplica a la condición inicial de lecho sedimentario. Los resultados del conjunto de ecuaciones expresan cómo un flujo de fluido móvil afecta a la erosión y a la deposición de sedimentos. La distribución del tamaño del grano de la condición inicial del lecho sedimentario se ajusta basándose en los resultados del conjunto de ecuaciones, para crear una condición de lecho sedimentario posterior que tenga una distribución del tamaño de grano asociada con la misma. El conjunto de ecuaciones vuelve a aplicarse a la condición de lecho sedimentario posterior un número de veces predeterminado. Se crea un modelo de yacimiento de hidrocarburos usando la condición de lecho sedimentario posterior. Se emite el modelo del yacimiento de hidrocarburos. Se predice una ubicación para extraer hidrocarburos del yacimiento de hidrocarburos. Los hidrocarburos se extraen del yacimiento de hidrocarburos.

La invención comprende la construcción de un modelo de un yacimiento de hidrocarburos. Se obtiene información relativa a un flujo de fluido por encima de un lecho sedimentario compuesto por una pluralidad de partículas sedimentarias. Se define un número  $i$  de intervalos que clasifican la pluralidad de partículas sedimentarias según el tamaño. Para cada uno de los intervalos, se calcula una tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$  de partículas sedimentarias desde el lecho sedimentario hacia el campo de flujo. La tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$  se calcula según

$$E_{si} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Z_i \leq Z_c \\ \frac{a_z Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi}{1 + \frac{a_z}{e_m} Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi} & \text{Si } Z_i > Z_c \end{cases}$$

en donde  $a_z$  es igual a aproximadamente  $1,3 \times 10^{-7}$ ,  $e_m$  es un valor máximo de la tasa de resuspensión sin dimensiones,  $\omega$  es un exponente  $Z$  principal,  $\varphi$  es un exponente  $Z$  secundario distinto de cero,  $Z_c$  es un valor umbral para el inicio de la resuspensión, y  $Z_i$  es una variable que tiene un valor afectado al menos en parte por el tamaño de grano de las partículas sedimentarias en el intervalo  $i$  respectivo. El modelo del yacimiento de hidrocarburos se construye usando la tasa de resuspensión sin dimensiones.

Breve descripción de los dibujos

La invención y sus ventajas pueden resultar evidentes revisando la siguiente descripción detallada y los dibujos de ejemplos no limitativos de realizaciones, en los que:

La figura 1A es una gráfica que muestra curvas que predicen el inicio de una suspensión significativa obtenida usando expresiones conocidas;

la figura 1B es una gráfica que muestra curvas que predicen el inicio de una suspensión significativa obtenida usando otras expresiones conocidas;

la figura 2 es una gráfica que muestra la tasa de resuspensión para sedimentos de diferentes tamaños de grano a partir de una mezcla uniforme según expresiones conocidas;

5 la figura 3 es una gráfica que muestra la relación entre la concentración de sedimentos cercanos al lecho y la concentración promedio de profundidad según diversas expresiones conocidas para la misma;

la figura 4 es una gráfica que compara el transporte de carga en lecho y el transporte de carga suspendida según expresiones conocidas;

10 la figura 5 es una gráfica que compara la tasa de resuspensión sin dimensiones en función de  $Z$ , calculada usando la presente invención y expresiones conocidas;

la figura 6 es una gráfica que compara el transporte de carga en lecho y el transporte de sedimentos de carga suspendida;

la figura 7 es una gráfica que compara diferentes funciones de  $\lambda$  según la invención;

15 la figura 8 es una gráfica que compara curvas para el inicio de suspensiones significativas de diferentes modelos, incluyendo la invención;

la figura 9 es una gráfica que muestra la tasa de resuspensión de sedimentos de diferentes tamaños de grano según la realización de la invención;

la figura 10 es una gráfica que muestra cómo la curva que representa el inicio de una suspensión significativa, generada usando la función de resuspensión de la invención, varía con diferentes valores de  $\gamma$ ;

20 la figura 11 es una gráfica que muestra cómo la curva que representa el inicio de la suspensión significativa, generada usando la función de resuspensión de la invención, varía con diferentes valores de  $\Xi_{Rp}$ ;

la figura 12 es una gráfica que compara los valores para  $r_0$  según la invención con modelos existentes;

la figura 13 es una gráfica que muestra cómo el valor de  $r_0$ , generado según la invención, varía con diferentes valores de  $\kappa$ ;

25 la figura 14 es una gráfica que muestra cómo el valor de  $r_0$ , generado según la invención, varía con diferentes valores de  $\theta$ ;

la figura 15 es un diagrama de flujo que muestra un método según una realización de la invención;

la figura 16 es un diagrama de flujo que muestra un método según otra realización de la invención;

la figura 17 es un diagrama de flujo que muestra otros aspectos de la invención; y

30 la figura 18 es un diagrama de bloques que muestra un sistema informático según la invención.

#### Descripción detallada de realizaciones preferidas

35 En esta sección se describen realizaciones específicas de la invención. Sin embargo, en la medida en que la descripción sea específica de una realización particular o un uso particular de la invención, se pretende que sea solo con fines ilustrativos y simplemente proporciona una descripción de realizaciones. Por consiguiente, la invención incluye todas las alternativas, modificaciones y equivalentes que se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

40 Algunas partes de la siguiente descripción detallada se presentan en cuanto a procedimientos, etapas, bloques lógicos, procesamiento y otras representaciones simbólicas de operaciones en bits de datos dentro de una memoria de ordenador. Estas descripciones y representaciones son los medios usados por los expertos en la técnica del procesamiento de datos para transmitir de la manera más eficaz la esencia de su trabajo a otros expertos en la técnica. En esta descripción detallada, un procedimiento, etapa, bloque lógico, proceso, o similares, se concibe para ser una secuencia autoconsistente de etapas o instrucciones que conducen a un resultado deseado. Las etapas son aquellas que requieren manipulaciones físicas de cantidades físicas. Normalmente, aunque no necesariamente, estas cantidades toman la forma de señales eléctricas o magnéticas capaces de almacenarse, transferirse, combinarse, 45 compararse y manipularse de otro modo en un sistema informático.

A menos que se indique expresamente lo contrario en las siguientes afirmaciones, términos tales como “evaluar”, “ajustar”, “definir”, “aplicar”, “reaplicar”, “reajustar”, “emitir”, “calcular”, “establecer”, “predecir”, “construir”, “crear”, “obtener”, “evaluar”, “definir”, o similares, pueden referirse a la acción y los procesos de un sistema informático, o

dispositivo informático electrónico similar, que manipula y transforma datos representados como cantidades físicas (electrónicas) dentro de los registros y memorias del sistema informático para dar otros datos representados de manera similar como cantidades físicas dentro de las memorias o registros de sistema informático u otros dispositivos de visualización o transmisión, almacenamiento de información. Estos términos y similares deben asociarse con las cantidades físicas apropiadas y son simplemente etiquetas convenientes aplicadas a estas cantidades.

Ejemplos de la invención también se refieren a un aparato para realizar las operaciones indicadas en el presente documento. Este aparato puede construirse especialmente para los fines requeridos, o puede incluir un ordenador de uso general activado o reconfigurado de manera selectiva por un programa informático almacenado en el ordenador. Un programa informático de este tipo puede almacenarse en un medio legible por ordenador. Un medio legible por ordenador incluye cualquier mecanismo para almacenar o transmitir información en un formato legible por una máquina, tal como un ordenador ("máquina" y "ordenador" se usan como sinónimos en el presente documento). Como ejemplo no limitativo, un medio legible por ordenador puede incluir un medio de almacenamiento legible por ordenador (por ejemplo, memoria de solo lectura ("ROM"), memoria de acceso aleatorio ("RAM"), medios de almacenamiento en disco magnético, medios de almacenamiento ópticos, dispositivos de memoria flash, etc.), y un medio de transmisión legible por ordenador (tales como señales eléctricas, ópticas, acústicas u otro formato de señales propagadas (por ejemplo, ondas portadoras, señales infrarrojas, señales digitales, etc.)).

Además, tal como resultará evidente para un experto habitual en la técnica relevante, los módulos, características, atributos, metodologías y otros aspectos de la invención pueden implementarse como software, hardware, firmware o cualquier combinación de los mismos. Siempre que un componente de la invención se implemente como software, el componente puede implementarse como un programa independiente, como parte de un programa más grande, como una pluralidad de programas independientes, como una biblioteca vinculada estática o dinámicamente, como un módulo cargable de kernel, como controlador de dispositivo, y/o de todas y cada una de las maneras conocidas ahora o en el futuro por aquellos expertos en la técnica de la programación informática. Además, la invención no se limita a la implementación en ningún sistema operativo o entorno específico.

Aspectos de la invención proporcionan nuevos modelos y expresiones que superan las deficiencias e incoherencias comentadas anteriormente. La invención puede usarse en cualquier modelo teórico o numérico, en 1D, 2D o 3D, para proporcionar relaciones de resuspensión (erosión), y la relación de concentración de sedimentos promedio cercanos al lecho con respecto a profundidad, que son necesarias para calcular el transporte, erosión y deposición de sedimentos en entornos realistas. Entonces, estos modelos teóricos y numéricos pueden usarse, por ejemplo, en interpretaciones de propiedades y arquitectura de yacimientos, modelado geológico de yacimientos de gas y petróleo y extracción de hidrocarburos de un yacimiento de hidrocarburos.

Para evaluar y calcular la tasa de resuspensión o arrastre de sedimentos de intervalo del tamaño de grano  $i$  en el flujo del lecho, la invención comienza con la relación conocida

$$E_i = E_{si} v_{si} G_i \quad [15]$$

pero calcula la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$  como

$$E_{si} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Z_i \leq Z_c \\ \frac{a_z Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi}{1 + \frac{a_z}{e_m} Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi} & \text{Si } Z_i > Z_c \end{cases} \quad [16]$$

En esta ecuación,  $a_z$  es una constante y, normalmente, tiene un valor de  $1,3 \times 10^{-7}$  y  $e_m$  es igual al valor máximo de la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$ , tal como se comentó anteriormente con respecto a la ecuación [2]. Además, el exponente  $\omega$  se denomina el "exponente de la función Z principal" y el exponente  $\varphi$  se denomina "exponente de la función Z secundario". Los valores para  $\omega$  pueden variar entre 1 y 20, y los valores para  $\varphi$  pueden variar entre  $0 < \varphi \leq 2$ . En la mayoría de los casos puede usarse un valor entre 4 y 5 para  $\omega$ , y el valor de 5 -  $\omega$  puede usarse para  $\varphi$ .

El método para evaluar la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_{si}$  mostrada en la ecuación [16] incluye un valor umbral  $Z_c$  para el inicio de la resuspensión. La figura 5 muestra la comparación de la tasa de resuspensión sin dimensiones entre la curva 51 que se obtuvo a partir de la ecuación [2], y la curva 52 que se obtuvo a partir de la ecuación [16]. La curva 52 para la ecuación [16] se calculó con parámetros  $\omega = 4,8$ ,  $\varphi = 0,2$  y  $Z_c = 3,5$ . La figura 5 muestra que la curva 52 se desvía de la curva 51 solo cuando el valor de  $Z$  cae a un nivel cercano a  $Z_c$ . La posibilidad de poder incorporar un umbral para la suspensión es especialmente útil cuando la función de resuspensión se usa junto con funciones de transporte de carga en lecho, que a menudo usan una tensión de cizalladura crítica como umbral para la iniciación de cualquier movimiento de sedimentos en el lecho. La elección adecuada de  $Z_c$  puede eliminar el tipo de incoherencias mostradas en la figura 4 tal como se comentó anteriormente en el presente documento. La figura 6 representa la relación del transporte volumétrico por anchura unitaria en función de la velocidad de flujo de cizalladura. Al igual que con la figura 4, el caso de transporte de carga de lecho está representado por la

curva 61 y la carga suspendida calculada usando la ecuación [2] se representa mediante la curva 62. La carga suspendida calculada según la ecuación [16] está representada por la curva 63. A partir de la figura puede observarse que la curva 63 permanece por debajo de la curva 61 cuando la velocidad de flujo de cizalladura  $u^* < 0,57$ . Para  $u^* < 0,3$  no hay transporte de carga de lecho. Cuando la velocidad de flujo de cizalladura  $u^* > 0,3$  la carga de lecho aumenta a medida que  $u^*$  aumenta. Con el nuevo modelo de resuspensión representado por la curva 63, la resuspensión no se produce hasta que  $u^*$  alcanza el valor crítico de 0,35. Tanto la carga de lecho como la carga suspendida aumentan a medida que  $u^*$  aumenta. La carga suspendida permanece menor que la carga de lecho hasta que  $u^*$  alcanza un valor de 0,57. Después de eso, la carga de suspensión supera la carga de lecho. Esto corrige las inconsistencias en el modelo anterior, tal como se observa en la figura 6, en donde para  $u^* < 0,34$  la curva 62 cruza por encima de la curva 61, lo que implica incorrectamente una transición de un transporte dominado por carga en lecho a un transporte dominado por carga suspendida cuando la velocidad de flujo de cizalladura  $u^*$  está disminuyendo.

La variable  $Z_i$  puede definirse adicionalmente, según la invención, como

$$Z_i = \lambda \frac{u^*}{v_{si}} f(R_{pi}) \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^v \quad [17]$$

en donde, de manera similar a la ecuación [3],  $\lambda$  es la función de corrección  $u^*$  es la velocidad de flujo de cizalladura,  $v_{si}$  es la velocidad de sedimentación para un grano de sedimento con un diámetro  $D_i$  en el  $i$ ésimo intervalo de tamaño,  $f(R_{pi})$  es la función de Reynolds, y  $D_{50}$  es el diámetro del grano de sedimento en el percentil 50 en la distribución. Adicionalmente,  $v$  es un exponente oculto que caracteriza la fuerza de las correcciones que surgen de las interacciones entre partículas de diferentes tamaños en una mezcla de sedimentos. Aunque  $v$  puede establecerse en 0,2, son posibles otros valores. El valor de  $v$  puede determinarse mejor ajustando empíricamente el modelo a conjuntos de datos experimentales conocidos. En ausencia de suficientes datos experimentales, puede usarse el valor de 0,2.

En la ecuación [17],  $\lambda = \lambda(\sigma_\phi)$  es una función que proporciona correcciones a  $Z_i$  para lechos con sedimentos de tamaños mixtos. La invención no se limita a usar la función conocida para  $\lambda$  tal como se expresa en la ecuación [4]. Un lecho mal clasificado a menudo da como resultado un pequeño valor para  $\lambda$  porque se ha observado que la tasa de resuspensión para partículas de sedimentos de un tamaño dado es, a menudo, menor si los sedimentos provienen del lecho con sedimentos mal clasificados, en comparación con el del lecho con sedimentos bien clasificados. En cambio, la invención puede usar la función

$$\lambda = (1 - \lambda_\infty) e^{-\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi 0}}} + \lambda_\infty \quad [18]$$

en donde

$$\sigma_{\phi 0} = \frac{-\sigma_{\phi c}}{\ln\left(\frac{\lambda_c - \lambda_\infty}{1 - \lambda_\infty}\right)} \quad [19]$$

En las ecuaciones [18] y [19],  $\lambda_\infty$  es el valor asintótico de  $\lambda$ . Es el límite bajo de  $\lambda$  para el peor escenario de clasificación. Los datos experimentales sugieren que el rango posible para  $\lambda_\infty$  sea entre 0 y a 0,811. Sin embargo, dado que actualmente solo hay una cantidad limitada de datos experimentales disponibles, pueden ser posibles otros valores para  $\lambda_\infty$  entre 0,811 y un valor que es inferior a 1. En estas ecuaciones  $\sigma_{\phi c}$  y  $\lambda_c$  son parámetros modelo, que tienen valores de 0,673 y 0,811 respectivamente, mientras que son posibles otros valores si se sugieren por experimentos o mediciones de campo observadas para sistemas de deposición modernos, tales como ríos, deltas, canales submarinos, y similares.

La figura 7 compara la relación entre  $\lambda$  y  $\sigma_\phi$ . La curva 71 se dibuja según la ecuación [4] y parece comportarse con los puntos de datos experimentales 72. Sin embargo, cuando  $\sigma_\phi$  es mayor de 3,5, el valor de  $\lambda$  es negativo, lo que es una imposibilidad física. Por el contrario, el uso de las ecuaciones [18] y [19] garantiza un valor positivo para  $\lambda$ . Esto se observa en la curva 73, que corresponde a  $\lambda_\infty = 0,25$ , y la curva 74, que corresponde a  $\lambda_\infty = 0,6$ .

Otra característica de la invención es la forma de la función de Reynolds  $f(R_{pi})$  tal como se usa en las ecuaciones [3] y [17]. Esta nueva función de Reynolds puede expresarse como

$$f(R_{pi}) = \begin{cases} \min(R_{pi}^\chi, \Xi_{Rp}) & \text{Si } R_{pi} > R_{pc} \\ \frac{R_{pc}^\chi}{\ln\left[\left(\frac{R_{pc}}{R_{p0}}\right)^\gamma + 1\right]} \ln\left[\left(\frac{R_{pi}}{R_{p0}}\right)^\gamma + 1\right] & \text{Si } R_{pi} \leq R_{pc} \end{cases} \quad [20]$$

en donde  $R_{pc}$  es el número de Reynolds de partícula crítica con un valor típico, pero no esencial, de 2,36 (es posible un valor seleccionado del rango entre 1 y 10);  $\Xi_{Rp}$  es el límite superior para  $f(R_{pi})$  y tiene un rango de valores entre 1 y 30 (se ha encontrado que un valor de 5 es adecuado en una variedad de instancias);  $\chi$  es un exponente para el que se ha encontrado que 0,6 es un valor adecuado (es posible un valor seleccionado del rango entre 0 y 1). Además,  $R_{p0}$  y  $\gamma$  son otros dos parámetros modelo. Un ejemplo de un valor encontrado adecuado para  $R_{p0}$  es 1,13621, aunque son posibles valores seleccionados del rango entre 0,1 y 10. Un ejemplo de un valor encontrado adecuado para  $\gamma$  es 1,35, aunque son posibles valores seleccionados del rango entre 0,1 y 10. Los valores para los exponentes y variables dados a conocer en el presente documento se han derivado a través de la búsqueda del mejor ajuste a las observaciones experimentales y de campo.

La figura 8 muestra una curva 81 que representa el inicio de una suspensión significativa según el nuevo modelo de resuspensión descrito en el presente documento. También se representan las curvas 12, 22 calculadas según el modelo de tesis de García comentado anteriormente y el modelo de 1993 de García, respectivamente. Las curvas mostradas en la figura son todas las curvas con  $Z = 5$ . Resulta evidente a partir de la figura 8 que la curva 81 aumenta monótonamente a medida que aumenta el tamaño de partícula. El segmento de la curva 81 correspondiente a las partículas de tamaños de grano pequeño (es decir,  $D < \text{aproximadamente } 0,3 \text{ mm}$ ) tiene una forma cóncava. La parte de la curva 81 correspondiente a partículas de tamaño de grano grande más grandes ya no cae por debajo de la curva 14 de Shields, sino que sigue de cerca la curva 15  $u^* = v_s$ . Por tanto, el nuevo modelo de resuspensión dado a conocer en el presente documento resuelve muchos, si no todos los problemas asociados con los modelos anteriores comentados en el presente documento.

Para demostrar adicionalmente la mejora de la invención, la figura 9 muestra la tasa de resuspensión sin dimensiones  $E_s$  representada gráficamente en función de la velocidad de flujo de cizalladura para diferentes tamaños de grano en la mezcla de la siguiente manera: un tamaño de grano de 6,25 micras se muestra mediante la curva 91, un tamaño de grano de 12,5 micras se muestra por la curva 92, un tamaño de grano de 25 micras se muestra por la curva 93, un tamaño de grano de 50 micras se muestra por la curva 94, un tamaño de grano de 100 micras se muestra por la curva 95, un tamaño de grano de 200 micras se muestra por la curva 96, un tamaño de grano de 400 micras se muestra por la curva 97, y un tamaño de grano de 800 micras se muestra por la curva 98. Los valores de la figura 9 se calculan usando las funciones de resuspensión de las ecuaciones [17] y [20]. Al comparar la figura 9 con la figura 2, puede observarse que el problema de la clasificación inversa ya no está presente. Dicho de otro modo, la tasa de resuspensión sin dimensiones disminuye sin excepción a medida que aumenta el tamaño del grano.

La figura 10 muestra la variación en los valores de velocidad de flujo de cizalladura en función del tamaño de grano del sedimento  $D$ , calculada usando las ecuaciones [17] - [20] con  $Z = 5$ , para diferentes valores de  $\gamma$ . Se recuerda que la relación entre la velocidad del flujo de cizalladura y el tamaño del grano del sedimento puede ser un indicador del inicio de la resuspensión. Específicamente, la curva 101 representa  $\gamma=0,5$ , la curva 102 representa  $\gamma=0,85$ , la curva 103 representa  $\gamma=1$ , la curva 104 representa  $\gamma=1,2$ , la curva 105 representa  $\gamma=1,35$ , la curva 106 representa  $\gamma=1,45$ , la curva 107 representa  $\gamma=1,5$ , y la curva 108 representa  $\gamma=1,55$ . La curva 12 de tesis de García también se muestra por motivos de comparación. Para sedimentos que tienen un tamaño de grano mayor que  $D \approx 0,6 \text{ mm}$ , las curvas 101-108 se solapan para todos los valores de  $\gamma$  sometidos a prueba. La figura 10 muestra que diferentes valores de  $\gamma$  afectan a la relación de resuspensión en el régimen de tamaños de grano pequeño.

La figura 11 muestra variaciones del inicio de la curva de resuspensión significativa generada usando las ecuaciones [17] - [20] con diferentes opciones del parámetro  $\Xi_{Rp}$ , que es la variable que expresa el límite superior de la función de Reynolds en la ecuación [20]. Específicamente, los valores seleccionados de  $\Xi_{Rp} = 2,5, 5, 10$  y  $20$  se denotan por las curvas 111, 112, 113 y 114, respectivamente. La curva 12, generada usando el método de tesis de García, y la curva 15, que representa la función  $u^* = v_s$ , se muestran por motivos de comparación. Las curvas 111-114 se solapan para tamaños de grano de sedimento pequeños, pero comienzan a separarse en el rango  $0,1 < D < 1$ . La figura 11 muestra que diferentes valores de la variable de límite superior  $\Xi_{Rp}$  afectan a la relación de resuspensión en el régimen de tamaños de grano grandes.

La función de resuspensión de la ecuación [16] puede usarse con un nuevo método para evaluar la relación de concentración de sedimentos promedio de lecho cercano con respecto a profundidad  $r_0$ . El nuevo método puede expresarse como

$$r_0 = \frac{1 - \delta r_\infty}{1 - \delta} \left[ \frac{1}{(\hat{u} + \delta) - \hat{u} e^{-\frac{(1-\delta)}{\hat{u}}}} + \frac{r_\infty - 1}{1 - \delta r_\infty} \right] \quad [21]$$

en donde

$$\hat{u} = \left( \kappa \frac{u^*}{v_s} \right)^\theta \quad [22]$$

5 En este caso,  $\delta$  es la fracción de la profundidad de flujo en el punto en el que se define la concentración de lecho cercano. En la mayoría de los casos, se ha encontrado que un valor de  $\delta = 0,05$  es adecuado, aunque también son posibles otros valores. En la ecuación [21],  $r_\infty$  es el límite inferior de  $r_0$ . En teoría,  $r_\infty$  debería ser 1. Empíricamente, un valor algo más alto de  $r_\infty$  parece dar mejores resultados. Se ha encontrado que los valores típicos para  $r_\infty$  oscilan entre 1 y 2. En la ecuación [22],  $\kappa$  y  $\theta$  son parámetros modelo. Estos parámetros pueden obtenerse ajustando los datos a experimentos en aplicaciones del mundo real. En la mayoría de los casos, el valor de  $\kappa$  puede oscilar entre 0,1 a 1, y  $\theta$  puede oscilar entre 0,5 a 3, aunque también son posibles otros valores.

10 La figura 12 muestra la curva 121 generada según las ecuaciones [21] y [22]. Se generaron otras curvas 36-39 usando modelos existentes para  $r_0$  tal como se comentó con respecto a la figura 3. Para calcular la curva 121,  $\delta = 0,05$ ,  $r_\infty = 1,65$ ,  $\kappa = 0,3$ , y  $\theta = 1$ . Resulta evidente a partir de la figura 12 que la curva 121, generada usando el modelo expresado en las ecuaciones [21] y [22], se ajusta muy bien a los conjuntos de datos experimentales disponibles (indicados por diamantes 34 y círculos 35) y mucho mejor que las curvas 36-39 que representan los modelos existentes.

15 La figura 13 muestra cómo las variaciones en el parámetro modelo  $\kappa$  modifican la curva generada según las ecuaciones [21] y [22]. La curva 121 es la misma que la curva 121 en la figura 12, en donde  $\kappa = 0,3$ . Para la curva 131,  $\kappa = 0,1$  y para la curva 132,  $\kappa = 1,0$ . Las curvas 36 y 39 representan resultados de los modelos existentes tal como se explicó anteriormente. Una vez más, todos los valores de  $\kappa$  mostrados en la figura 13 proporcionan un mejor ajuste a los datos experimentales 34, 35 que las curvas que representan los modelos existentes.

20 La figura 14 muestra cómo las variaciones en el parámetro modelo  $\theta$  modifican la curva generada según las ecuaciones [21] y [22]. La curva 121 es la misma que la curva 121 en la figura 12, en donde  $\theta = 1$ . Para la curva 141,  $\theta = 0,5$  y para la curva 142,  $\theta = 2,0$ . Las curvas 36 y 39 representan resultados de los modelos existentes tal como se explicó anteriormente. Una vez más, todos los valores de  $\theta$  mostrados en la figura 14 proporcionan un mejor ajuste a los datos experimentales 34, 35 que las curvas que representan los modelos existentes.

25 Los métodos a modo de ejemplo pueden apreciarse mejor con referencia a los diagramas de flujo. Aunque con fines de simplicidad de explicación, las metodologías ilustradas se muestran y describen como una serie de bloques, es preciso apreciar que las metodologías no se ven limitadas por el orden de los bloques, dado que algunos bloques pueden producirse en diferentes órdenes y/o simultáneamente con otros bloques diferentes de los mostrados y descritos. Además, pueden requerirse menos bloques de todos los bloques ilustrados para implementar una metodología a modo de ejemplo. Los bloques pueden combinarse o separarse en múltiples componentes. Además, metodologías adicionales y/o alternativas pueden emplear bloques adicionales que no se muestran en el presente documento. Aunque las figuras ilustran diversas acciones que se producen en serie, cabe apreciar que pueden producirse diversas acciones en serie, sustancialmente en paralelo, y/o en momentos en el tiempo sustancialmente diferentes.

30 La figura 15 es un diagrama de flujo que muestra un método 150 según una realización de la invención. En el bloque 151 se recibe información o datos relativos a un campo de flujo tridimensional en la parte superior de un lecho sedimentario, en el que el lecho sedimentario tiene una distribución de tamaño de grano  $G$ . Tal como se explicó anteriormente en la ecuación [15], la resuspensión de sedimentos es en función del tamaño del grano. En el bloque 152 la distribución del tamaño de grano  $G$  se subdivide en una pluralidad de intervalos, en donde cada intervalo representa un rango de tamaño de grano diferente dentro de la distribución del tamaño de grano  $G$ . En el bloque 153, la velocidad de flujo de cizalladura  $u^*$  se calcula usando las características conocidas de las partículas sedimentarias (por ejemplo, tamaño y densidad) y del fluido (por ejemplo, viscosidad). En el bloque 154 se calcula la función de Reynolds  $f(R_{pi})$  para cada intervalo. En el bloque 155 se calcula el parámetro de clasificación  $\sigma_\phi$  para cada intervalo. En la etapa 156 la función de corrección  $\lambda$  se calcula usando el valor del parámetro de clasificación calculado en el bloque 155.

35 Una vez que se conocen  $\lambda$  y  $f(R_{pi})$ , en el bloque 157 se calcula la función  $Z_i$  para cada intervalo. En el bloque 158, la tasa de resuspensión  $E_{si}$  se calcula para cada tamaño de intervalo. A continuación, puede determinarse la tasa de deposición por erosión neta, tal como se representa en el bloque 159. Entonces, esta información puede enviarse a un modelo geológico, que en una realización puede usarse para realizar simulaciones de rendimiento de yacimientos

de hidrocarburos, seleccionar ubicaciones para nuevos pozos, estimar reservas de hidrocarburos, planificar estrategias de desarrollo de yacimientos y realizar operaciones similares, todas las cuales ayudan a extraer hidrocarburos de yacimientos de hidrocarburos modelados de este modo.

5 La invención puede usarse en situaciones en las que es difícil o imposible obtener información o datos sobre un campo de flujo tridimensional. La figura 16 es un diagrama de flujo que muestra un método 161 según otra realización de la invención. En el bloque 162 se recibe información o datos relativos a un campo de flujo promedio de profundidad bidimensional en la parte superior de un lecho sedimentario, en el que el lecho sedimentario tiene una distribución de tamaño de grano  $G$ . En el bloque 163, la distribución del tamaño de grano  $G$  se subdivide en una pluralidad de intervalos, en donde cada intervalo representa un rango de tamaño de grano diferente dentro de la distribución de tamaño de grano  $G$ . El cálculo o determinación de  $u^*$ ,  $f(R_{pi})$ ,  $\sigma_{\phi}$ ,  $\lambda$ ,  $Z_i$  y  $E_{si}$  se completan entonces en los bloques 164-169, respectivamente, tal como se comentó anteriormente en el presente documento. En el bloque 170 se determina la relación de concentración de sedimentos promedio cerca del lecho con respecto a profundidad  $r_0$ . Entonces, puede calcularse la tasa de deposición por erosión neta, tal como se representa por el bloque 171, y en el bloque 172 los resultados se emiten a un modelo geológico, por ejemplo, tal como se comentó anteriormente. El modelo geológico puede usarse para determinar los mejores métodos a usar para extraer un hidrocarburo de un yacimiento de hidrocarburos que se ha modelado de este modo.

La figura 17 es un diagrama de flujo según otros aspectos de la invención. En el bloque 181 se evalúan los datos que representan la erosión de sedimentos observada y el comportamiento de deposición. Tales datos pueden tomarse de observaciones del mundo real o de experimentos controlados. En el bloque 182 se ajusta un parámetro en un conjunto de ecuaciones de modo que el resultado del conjunto de ecuaciones coincide con precisión con la erosión de sedimento observada y el comportamiento de deposición para tamaños de sedimentos en un rango entre aproximadamente 10 micras y aproximadamente 10 centímetros. Tal como se comentó anteriormente, a excepción de las ecuaciones dadas a conocer en el presente documento, ningún conjunto conocido de ecuaciones coincide exactamente con la erosión de los sedimentos y el comportamiento de deposición observados en todo el rango entre aproximadamente 10 micras y aproximadamente 10 centímetros. El conjunto de ecuaciones incluye una o más de las ecuaciones [16] - [22]. El parámetro que tiene su valor ajustado puede ser uno o más de  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $Z_c$ ,  $u$ ,  $\lambda_{\infty}$ ,  $\sigma_{\phi c}$ ,  $\lambda_c$ ,  $R_{pc}$ ,  $E_{Rp}$ ,  $\chi$ ,  $R_{p0}$ ,  $\gamma$ ,  $r_{\infty}$ ,  $\kappa$ , o  $\theta$  tal como se definen en el presente documento, o puede ser otros parámetros definidos en las ecuaciones [16] - [22]. Más de un parámetro en el conjunto de ecuaciones puede ajustarse según sea necesario. En el bloque 183 se define la distribución del tamaño de grano de una condición inicial de un lecho sedimentario. Tal definición puede incluir definir cómo se depositan inicialmente sedimentos de diferentes tamaños en el lecho sedimentario y/o a lo largo del mismo. La condición inicial puede representar el estado actual del lecho sedimentario, o, alternativamente, puede representar el estado del lecho sedimentario en algún momento pasado. En el bloque 184 el conjunto de ecuaciones con el valor de parámetro ajustado se aplica a la condición inicial del lecho sedimentario. Los resultados del conjunto de ecuaciones expresan cómo el flujo de fluido afecta a la erosión y a la deposición de sedimentos en la condición inicial del lecho sedimentario. En el bloque 185, la distribución del tamaño del grano de la condición inicial del lecho sedimentario se ajusta basándose en los resultados del conjunto de ecuaciones, creando de este modo una condición de lecho sedimentario posterior. El lecho sedimentario posterior tiene una distribución del tamaño del grano asociada al mismo que expresa cómo se deposita el sedimento sobre y/o a lo largo del lecho sedimentario después de que el flujo de fluido haya interactuado con el sedimento durante un período de tiempo determinado. Dependiendo de muchas variables y parámetros tales como el tamaño del sedimento y la velocidad del flujo, el flujo de fluido erosionará parte del sedimento y redepositará parte del sedimento en diversos lugares a lo largo del lecho sedimentario. Dado que los yacimientos subsuperficiales, tales como los yacimientos de hidrocarburos, se forman, normalmente, durante un período de miles o millones de años, una única aplicación del conjunto de ecuaciones a las condiciones del lecho sedimentario puede no predecir con precisión la formación de yacimientos de hidrocarburos. Por tanto, si se considera necesario, en el bloque 186 el conjunto de ecuaciones con el valor del parámetro ajustado vuelve a aplicarse a la condición del lecho sedimentario posterior durante un número de veces predeterminado. El número de veces predeterminado se elige para aproximar las condiciones del yacimiento de hidrocarburos, basándose en un tiempo de formación del yacimiento estimado. Por tanto, el número predeterminado puede ser cualquier número, pero suele estar en el orden de miles, millones o incluso decenas de millones. En el bloque 187, la distribución del tamaño del grano de la condición del lecho sedimentario posterior se reajusta después de cada reaplicación del conjunto de ecuaciones con el valor del parámetro ajustado. Después de que la condición del lecho sedimentario posterior se haya reajustado el número de veces predeterminado, la condición del lecho sedimentario puede predecir cómo se han depositado los sedimentos en un yacimiento de hidrocarburos, y en el bloque 188 puede construirse o crearse un modelo del yacimiento de hidrocarburos con el mismo. El modelo de yacimiento puede proporcionar información sobre la ubicación actual de sedimentos de diferentes tamaños en el yacimiento y, por tanto, puede predecir con precisión la permeabilidad y/u otros factores que afectan a la extracción de hidrocarburos, en diversas ubicaciones del yacimiento. En el bloque 189, el modelo de yacimiento se emite a un elemento de visualización, a una impresión de ordenador o a un medio de almacenamiento informático. En el bloque 190, el modelo de yacimiento puede usarse para predecir ubicaciones óptimas para extraer hidrocarburos del yacimiento. En el bloque 191 se extraen hidrocarburos del yacimiento de hidrocarburos usando técnicas de extracción de hidrocarburos conocidas.

La invención tal como se describe en el presente documento ha proporcionado ecuaciones, expresiones y relaciones relacionadas con el flujo y resuspensión de sedimentos, por ejemplo, las ecuaciones [16] - [22]. Estas ecuaciones

5 pueden usarse en cualquier combinación con expresiones y conceptos conocidos, tales como las ecuaciones [1] - [14], para predecir el comportamiento de los sedimentos o para ajustarse mejor a datos empíricos para una situación determinada. Por ejemplo, haciendo referencia a la figura 15, la función de Reynolds  $f(R_{pi})$  (bloque 154) y la función de corrección  $\lambda$  (bloque 156) pueden calcularse usando las ecuaciones [20] y [18] - [19], respectivamente, mientras que  $Z_i$  (bloque 157) y la tasa de resuspensión  $E_{si}$  (bloque 158) pueden calcularse usando las ecuaciones conocidas previamente [3] y [2], respectivamente. Del mismo modo, cualquier otra combinación de conceptos conocidos y de la invención se encuentra dentro del alcance de la invención. Además, en el presente documento se han definido muchos parámetros y variables que tienen valores determinados mediante la evaluación de los resultados de experimentos o del comportamiento del sedimento/flujo observado. Los valores de los parámetros y variables que se dan a conocer en el presente documento pueden variar para corresponder o ajustarse a conjuntos de datos experimentales adicionales. Se considera que tales variaciones en los valores de parámetro/variable se encuentran dentro del alcance de la invención.

15 La figura 18 representa un diagrama de bloques de un entorno 200 informático que puede implementar uno o más de los métodos dados a conocer según la invención. El entorno 200 informático incluye un ordenador 230 de sistema, que puede implementarse como cualquier ordenador personal o estación de trabajo convencionales, tales como una estación de trabajo basada en UNIX. El ordenador 230 de sistema está en comunicación con los dispositivos 229, 231 y 233 de almacenamiento en disco, cada uno de los cuales puede ser cualquier tipo conocido de medio de almacenamiento legible por ordenador, tales como dispositivos de almacenamiento en disco duro externos que están o bien conectados directamente al equipo del sistema o bien a los que se accede mediante el uso de una red de área local o mediante acceso remoto. Aunque los dispositivos 229, 231 y 233 de almacenamiento en disco se ilustran como dispositivos independientes, puede usarse un único dispositivo de almacenamiento en disco para almacenar todas y cada una de las instrucciones de programa, datos de medición y resultados según se desee.

25 En una realización, los datos de entrada se almacenan en el dispositivo 231 de almacenamiento en disco. El ordenador 230 de sistema puede recuperar datos apropiados del dispositivo 231 de almacenamiento en disco para realizar la evaluación del yacimiento y creación del modelo según instrucciones de programa que corresponden a los métodos descritos en el presente documento. Las instrucciones de programa pueden escribirse en un lenguaje de programación informática, tal como C++, Java y similares. Las instrucciones de programa pueden almacenarse en una memoria legible por ordenador, tal como el dispositivo 233 de almacenamiento en disco de programa. El ordenador 230 de sistema presenta salidas principalmente a un elemento 227 de visualización gráfica, o alternativamente a una impresora 228. El ordenador 230 de sistema puede almacenar los resultados de los métodos descritos anteriormente en el almacenamiento 229 en disco, para su uso posterior y análisis adicional. El teclado 226 y el dispositivo 225 señalador (por ejemplo, un ratón, bola de desplazamiento, etc.) pueden dotarse del ordenador 230 de sistema para permitir el funcionamiento interactivo. El ordenador 230 de sistema puede estar ubicado en un centro de datos remoto con respecto al yacimiento. Además, aunque la descripción anterior se encuentra en el contexto de instrucciones ejecutables por ordenador que pueden ejecutarse en uno o más ordenadores, los expertos en la técnica reconocerán que el contenido tal como se reivindica también puede implementarse en combinación con otros módulos de programa y/o como una combinación de hardware y software.

40 Las realizaciones de la invención comentadas en el presente documento solo son ejemplos de la invención, entendiéndose que la invención puede ser susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas. De hecho, la invención incluye todas las alternativas, modificaciones y equivalentes que se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método implementado por ordenador para extraer hidrocarburos de un yacimiento de hidrocarburos que incluye:  
evaluar datos (181) que representan la erosión de sedimentos y el comportamiento de deposición observados en el yacimiento de hidrocarburos;
- 5   ajustar un valor de parámetro (182) en un conjunto de ecuaciones de modo que el resultado del conjunto de ecuaciones coincide con exactitud con la erosión de sedimentos y el comportamiento de deposición observados para tamaños de sedimentos en un rango de entre aproximadamente 10 micras y aproximadamente 10 centímetros;  
definir una distribución de tamaño de grano de una condición inicial (183) de un lecho sedimentario en el yacimiento de hidrocarburos;
- 10   aplicar el conjunto de ecuaciones con el valor de parámetro ajustado a la condición inicial (184) del lecho sedimentario, en el que los resultados del conjunto de ecuaciones expresan cómo un flujo fluido afecta a la erosión y deposición de sedimentos en la condición inicial del lecho sedimentario;  
ajustar la distribución del tamaño del grano de la condición inicial (185) del lecho sedimentario basándose en los resultados del conjunto de ecuaciones, para crear una condición del lecho sedimentario posterior que tenga asociada una distribución del tamaño de grano con la misma;
- 15   volver a aplicar el conjunto de ecuaciones (186) con el valor del parámetro ajustado a la condición de lecho sedimentario posterior un número de veces predeterminado;  
crear un modelo (188) del yacimiento de hidrocarburos usando la condición del lecho sedimentario posterior; y  
emitir el modelo (189) del yacimiento de hidrocarburos;
- 20   predecir una ubicación (190) para extraer hidrocarburos del yacimiento de hidrocarburos; y  
extraer hidrocarburos (191) del yacimiento de hidrocarburos;  
caracterizado porque el método comprende, además, las etapas de:  
reajustar la distribución del tamaño del grano de la condición del lecho sedimentario posterior (187) después de cada reaplicación del conjunto de ecuaciones con el valor del parámetro ajustado; y
- 25   en el que el conjunto de ecuaciones incluye una ecuación que representa una tasa de resuspensión sin dimensiones de sedimentos desde el lecho sedimentario hacia el flujo fluido, calculando la velocidad de resuspensión sin dimensiones (158) para cada uno de los intervalos de sedimentos definidos por tamaño  $i$  según

$$E_{si} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Z_i \leq Z_c \\ \frac{a_z Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi}{1 + \frac{a_z}{e_m} Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi} & \text{Si } Z_i > Z_c \end{cases}$$

30   en donde  $a_z$  es igual a aproximadamente  $1,3 \times 10^{-7}$ ,  $e_m$  es un valor máximo de la tasa de resuspensión sin dimensiones,  $\omega$  es un exponente Z principal que tiene un valor seleccionado de un rango entre 1 y 20,  $\varphi$  es un exponente Z secundario distinto de cero que tiene un valor de  $5 - \omega$ ,  $Z_c$  es un valor umbral para el inicio de la resuspensión, y  $Z_i$  es una variable que tiene un valor afectado, al menos en parte, por el tamaño de grano de las partículas sedimentarias en el intervalo  $i$  respectivo.

- 35   2. El método según la reivindicación 1, en el que  $\omega$  tiene un valor seleccionado de un rango entre aproximadamente 4 y aproximadamente 5.
3. El método según la reivindicación 1, en el que  $\varphi$  tiene un valor inferior a 2.
4. El método según la reivindicación 1, en el que el valor de  $Z_i$  se calcula según

$$Z_i = \lambda \frac{u^*}{v_{si}} f(R_{pi}) \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^v$$

40   en donde  $\lambda$  es una función de corrección,  $u^*$  es una velocidad de flujo de cizalladura,  $D_i$  es un diámetro de granos de sedimento en el  $i$ ésimo intervalo,  $v_{si}$  es una velocidad de sedimentación para un grano de sedimento con diámetro  $D_i$ ,

$f(R_{pi})$  es una función de Reynolds para granos de sedimentos en el  $i$ ésimo intervalo,  $D_{50}$  es un diámetro de un grano de sedimento en el percentil 50 en la distribución del tamaño del grano, y  $\nu$  es un exponente que caracteriza la fuerza de las correcciones que surgen de interacciones entre partículas de diferentes tamaños en la pluralidad de partículas sedimentarias.

- 5. El método según la reivindicación 4, en el que  $\nu$  tiene un valor que no es igual a 0,2.
- 6. El método según la reivindicación 4, en el que se calcula la función de corrección  $\lambda$  según

$$\lambda = (1 - \lambda_{\infty})e^{-\frac{\sigma_{\Phi}}{\sigma_{\Phi 0}}} + \lambda_{\infty}$$

en donde  $\lambda_{\infty}$  es un límite bajo de la función de corrección  $\lambda$ ,  $\sigma_{\Phi}$  es una desviación estándar de la distribución del tamaño del grano, y  $\sigma_{\Phi 0}$  se calcula según

$$\sigma_{\Phi 0} = \frac{-\sigma_{\Phi c}}{\ln\left(\frac{\lambda_c - \lambda_{\infty}}{1 - \lambda_{\infty}}\right)}$$

en donde  $\sigma_{\Phi c}$  y  $\lambda_c$  son variables numéricas.

- 7. El método según la reivindicación 6, en donde  $\lambda_{\infty}$  tiene un valor en el rango entre aproximadamente 0 y aproximadamente 0,811.
- 8. El método según la reivindicación 6, en donde  $\sigma_{\Phi c}$  tiene un valor de aproximadamente 0,673.
- 9. El método según la reivindicación 6, en donde  $\lambda_c$  tiene un valor de aproximadamente 0,811.
- 10. El método según la reivindicación 4, en el que se calcula la función de Reynolds según

$$f(R_{pi}) = \begin{cases} \min(R_{pi}^{\chi}, \Xi_{Rp}) & \text{Si } R_{pi} > R_{pc} \\ \frac{R_{pc}^{\chi}}{\ln\left[\left(\frac{R_{pc}}{R_{p0}}\right)^{\gamma} + 1\right]} \ln\left[\left(\frac{R_{pi}}{R_{p0}}\right)^{\gamma} + 1\right] & \text{Si } R_{pi} \leq R_{pc} \end{cases}$$

en donde  $R_{pc}$  es un número de partícula crítica de Reynolds que tiene un valor seleccionado de un rango entre 1 y 10,  $\Xi_{Rp}$  es un límite superior para la función de Reynolds que tiene un valor seleccionado de un rango entre 1 a 30,  $\chi$  es un exponente que tiene un valor seleccionado de un rango entre 0 y 1,  $R_{p0}$  es un parámetro que tiene un valor seleccionado de un rango entre 0,1 y 10, y  $\gamma$  es un exponente que tiene un valor seleccionado de un rango entre 0,1 y 10.

- 11. El método según la reivindicación 10, en el que  $\chi$  tiene un valor de aproximadamente 0,6.
- 12. El método según la reivindicación 10, en el que  $\gamma$  tiene un valor de aproximadamente 1,35.
- 13. El método según la reivindicación 10, en el que  $\Xi_{Rp}$  tiene un valor de aproximadamente 5.
- 14. El método según la reivindicación 1, en el que el conjunto de ecuaciones incluye una ecuación que expresa una relación  $r_0$  entre una concentración de sedimento cercano al lecho y una concentración de sedimentos promedio de profundidad, en el que la relación se evalúa según

$$r_0 = \frac{1 - \delta r_{\infty}}{1 - \delta} \left[ \frac{1}{(\hat{u} + \delta) - \hat{u} e^{-\frac{(1-\delta)}{\hat{u}}}} + \frac{r_{\infty} - 1}{1 - \delta r_{\infty}} \right]$$

- en donde  $\delta$  es una fracción de una profundidad de flujo en un punto en el que se define la concentración de lecho cercano,  $r_{\infty}$  es un límite inferior de  $r_0$ , y  $\hat{u}$  se calcula según

$$\hat{u} = \left( \kappa \frac{u^*}{v_s} \right)^\theta$$

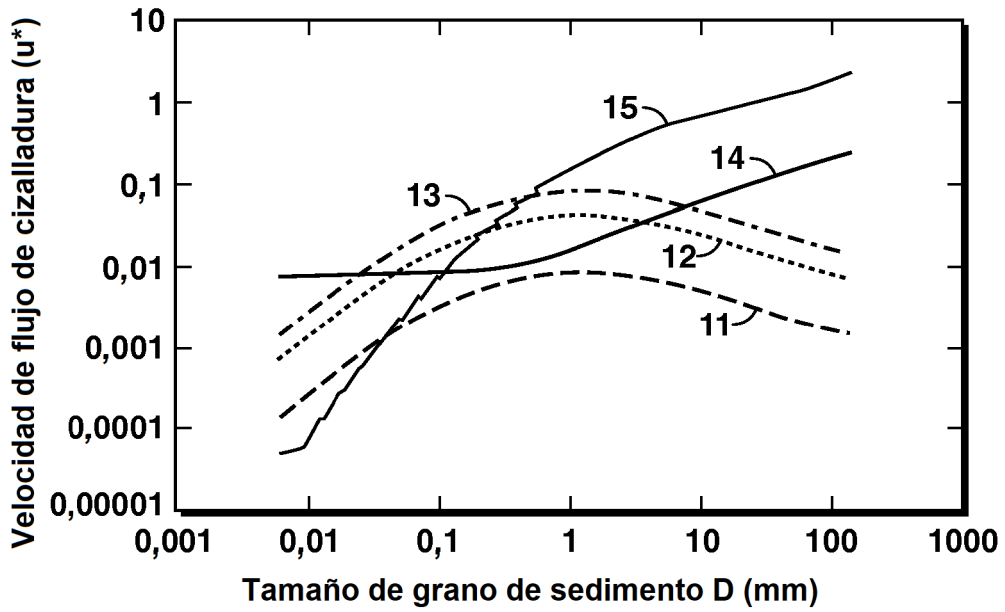
en donde  $\kappa$  y  $\theta$  son parámetros modelo y  $v_s$  es la velocidad de sedimentación para el sedimento en la región de sedimento cercano al lecho.

15. El método según la reivindicación 14, en el que  $\delta$  tiene un valor de aproximadamente 0,05.
- 5 16. El método según la reivindicación 14, en el que  $r_\infty$  tiene un valor de entre aproximadamente 1 y aproximadamente 2.
17. El método según la reivindicación 14, en el que  $\kappa$  tiene un valor de entre aproximadamente 0,1 y aproximadamente 1.
18. El método según la reivindicación 14, en el que  $\theta$  tiene un valor de entre aproximadamente 0,5 y aproximadamente 3.
19. Un producto de programa informático que tiene una lógica ejecutable de ordenador grabada en un medio legible por ordenador tangible, comprendiendo el producto del programa informático:
- 10 código para evaluar datos que representan la erosión de sedimentos y el comportamiento de deposición observados en un yacimiento de hidrocarburos;
- código para ajustar un valor de parámetro en un conjunto de ecuaciones de modo que el resultado del conjunto de ecuaciones coincide con precisión con la erosión del sedimento y el comportamiento de deposición observados para tamaños de sedimentos en un rango entre aproximadamente 10 micras y aproximadamente 10 centímetros;
- 15 código para definir una distribución de tamaño de grano de una condición inicial de un lecho sedimentario en el yacimiento de hidrocarburos;
- código para aplicar el conjunto de ecuaciones con el valor de parámetro ajustado a la condición inicial del lecho sedimentario, en el que los resultados del conjunto de ecuaciones expresan cómo un flujo de fluido afecta a la erosión y la deposición de sedimentos en la condición inicial del lecho sedimentario;
- 20 código para ajustar la distribución del tamaño del grano de la condición inicial del lecho sedimentario basándose en los resultados del conjunto de ecuaciones, para crear una condición de lecho sedimentario posterior que tenga asociada una distribución del tamaño de grano a la misma;
- código para volver a aplicar el conjunto de ecuaciones con el valor de parámetro ajustado a la condición de lecho sedimentario posterior un número de veces predeterminado;
- 25 y
- código para crear un modelo del yacimiento de hidrocarburos usando la condición de lecho sedimentario posterior;
- caracterizado porque:
- el producto de programa informático incluye, además, un código para reajustar la distribución del tamaño del grano de la condición de lecho sedimentario posterior después de cada reaplicación del conjunto de ecuaciones con el valor del
- 30 parámetro ajustado; y
- el conjunto de ecuaciones incluye una ecuación que representa una tasa de resuspensión sin dimensiones de sedimentos desde el lecho sedimentario hacia el flujo fluido, en el que la tasa de resuspensión sin dimensiones para cada uno de los intervalos de sedimentos definidos por tamaño  $i$  se calcula según

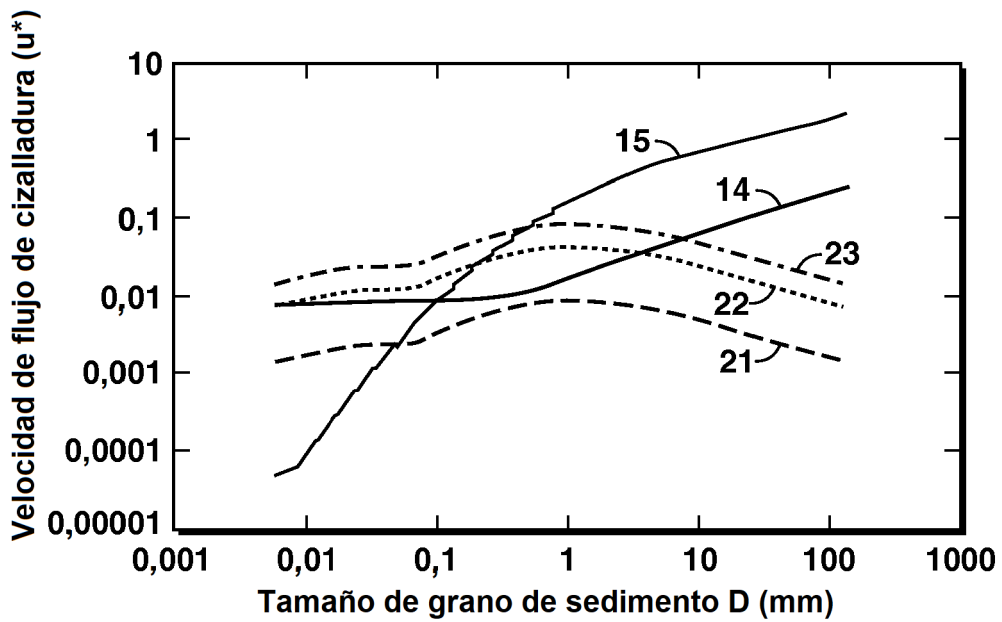
$$E_{si} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Z_i \leq Z_c \\ \frac{a_z Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi}{1 + \frac{a_z}{e_m} Z_i^{\omega-\varphi} (Z_i - Z_c)^\varphi} & \text{Si } Z_i > Z_c \end{cases}$$

- 35 en donde  $a_z$  es igual a aproximadamente  $1,3 \times 10^{-7}$ ,  $e_m$  es un valor máximo de la tasa de resuspensión sin dimensiones,  $\omega$  es un exponente Z principal que tiene un valor seleccionado de un rango entre 1 y 20,  $\varphi$  es un exponente Z secundario distinto de cero que tiene un valor de  $5 - \omega$ ,  $Z_c$  es un valor umbral para el inicio de la resuspensión, y  $Z_i$  es una variable que tiene un valor afectado, al menos en parte, por el tamaño de grano de las partículas sedimentarias en el intervalo  $i$  respectivo.

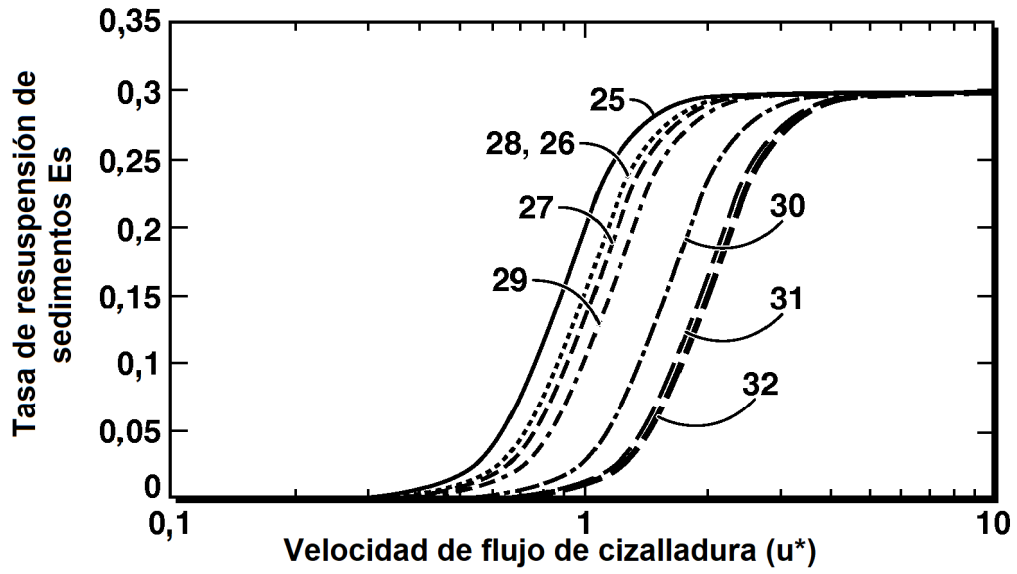
40



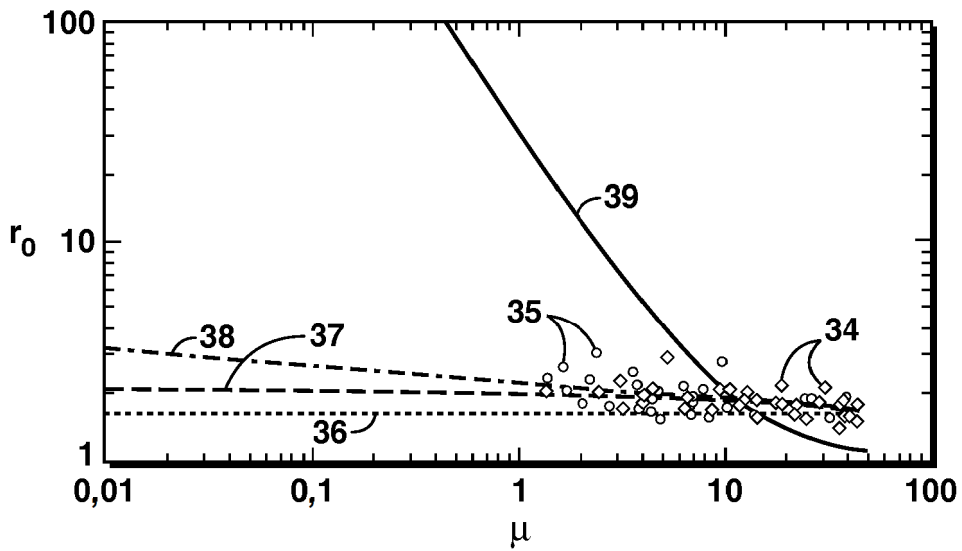
**FIG. 1A**  
(Técnica anterior)



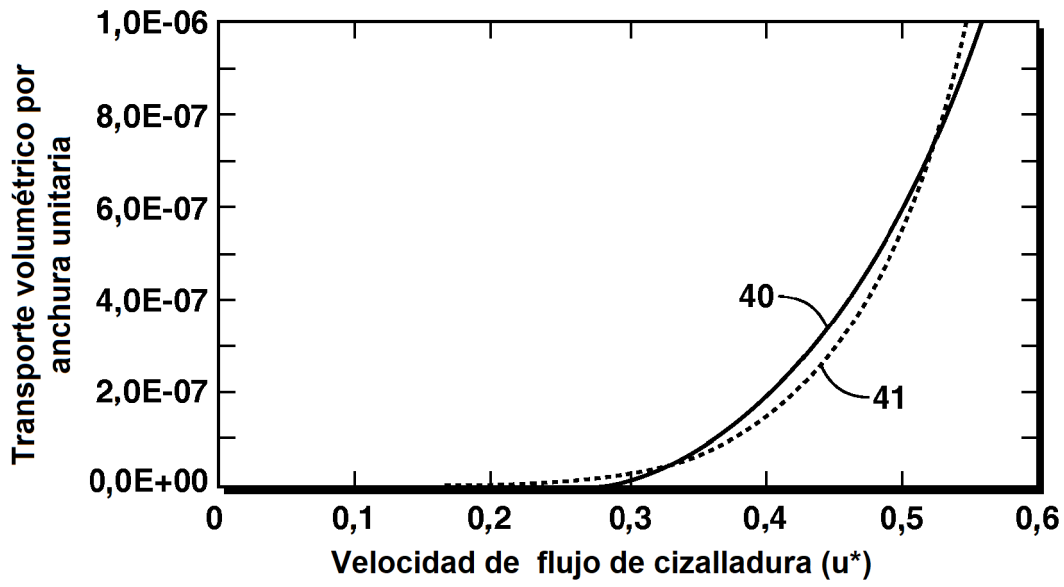
**FIG. 1B**  
(Técnica anterior)



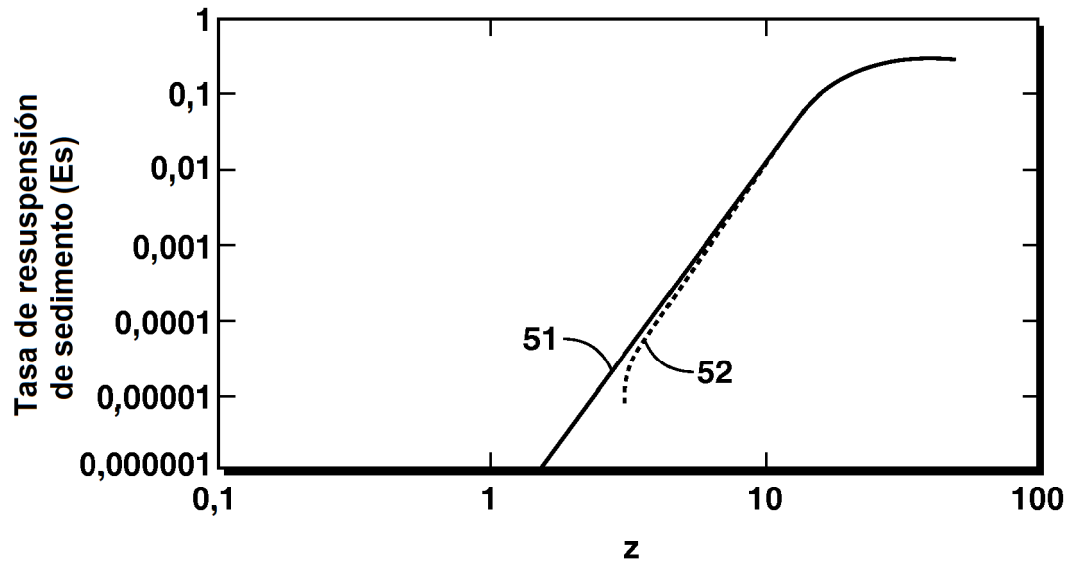
**FIG. 2**  
(Técnica anterior)



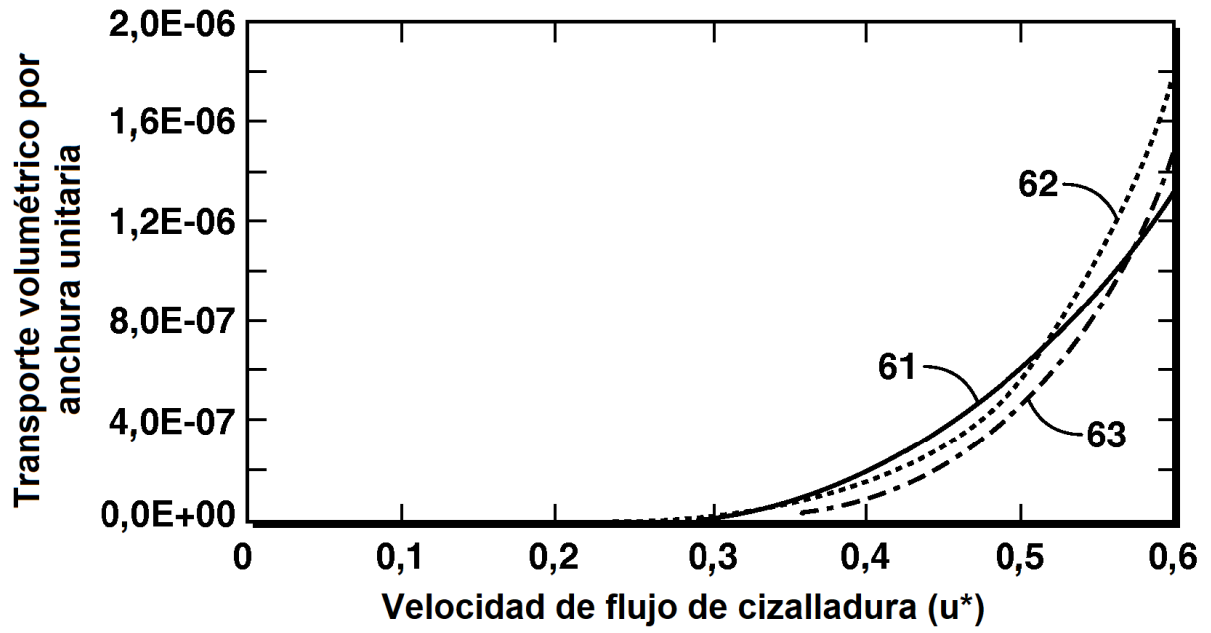
**FIG. 3**  
(Técnica anterior)



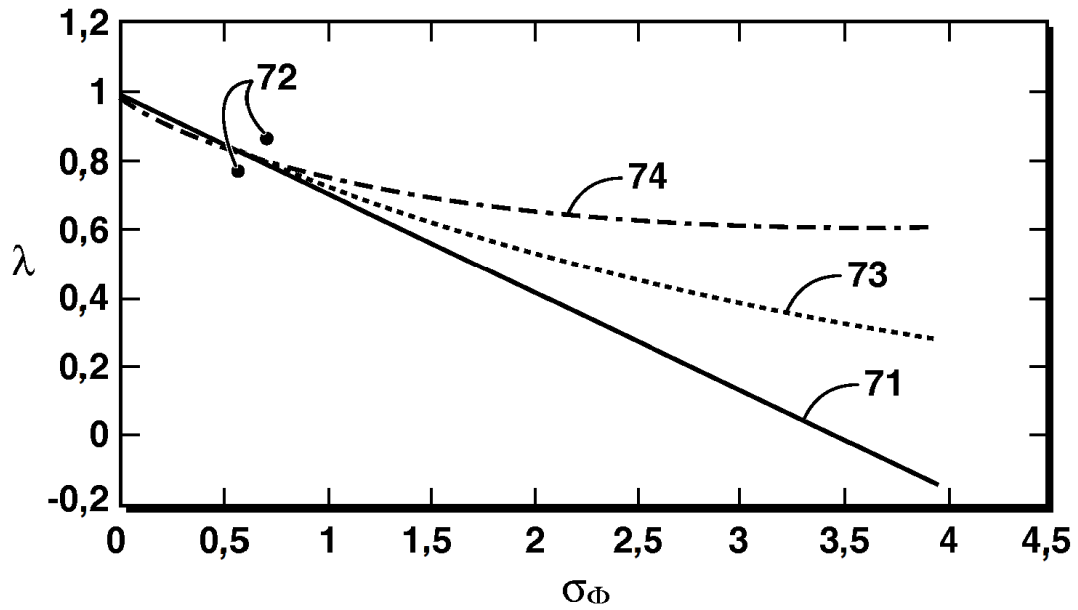
**FIG. 4**  
(Técnica anterior)



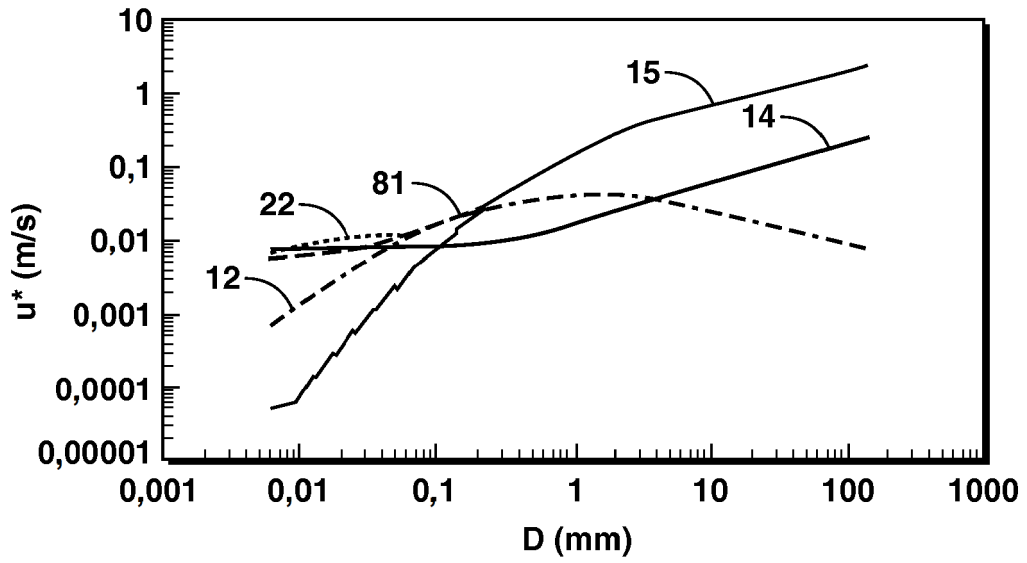
**FIG. 5**



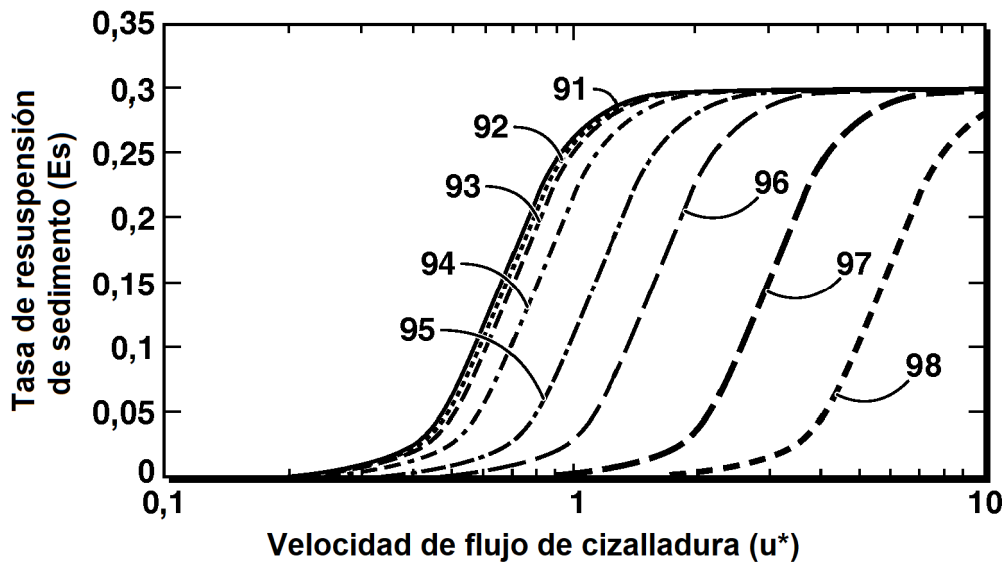
**FIG. 6**



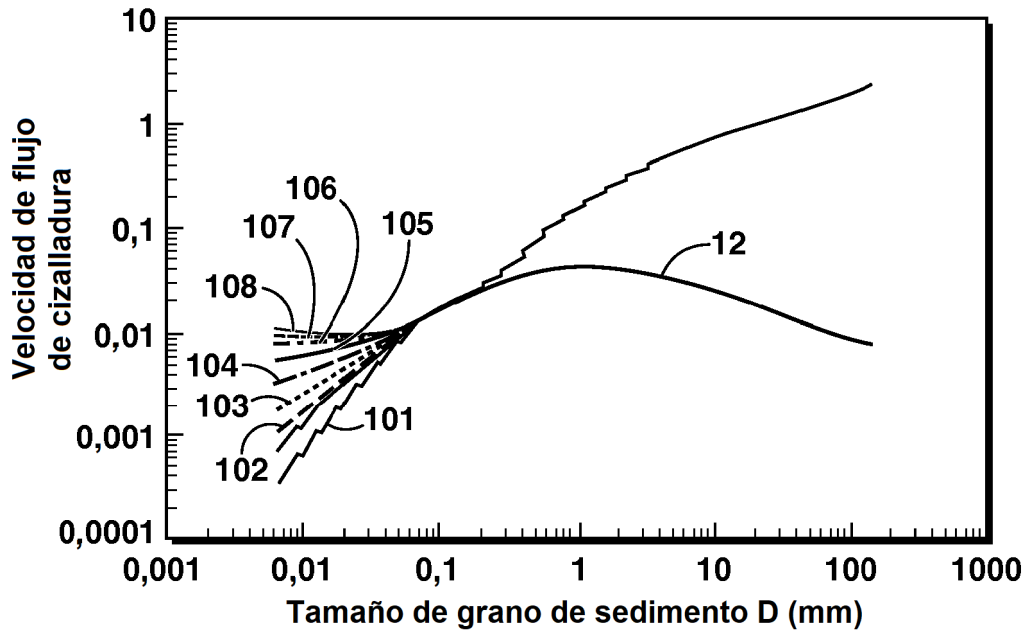
**FIG. 7**



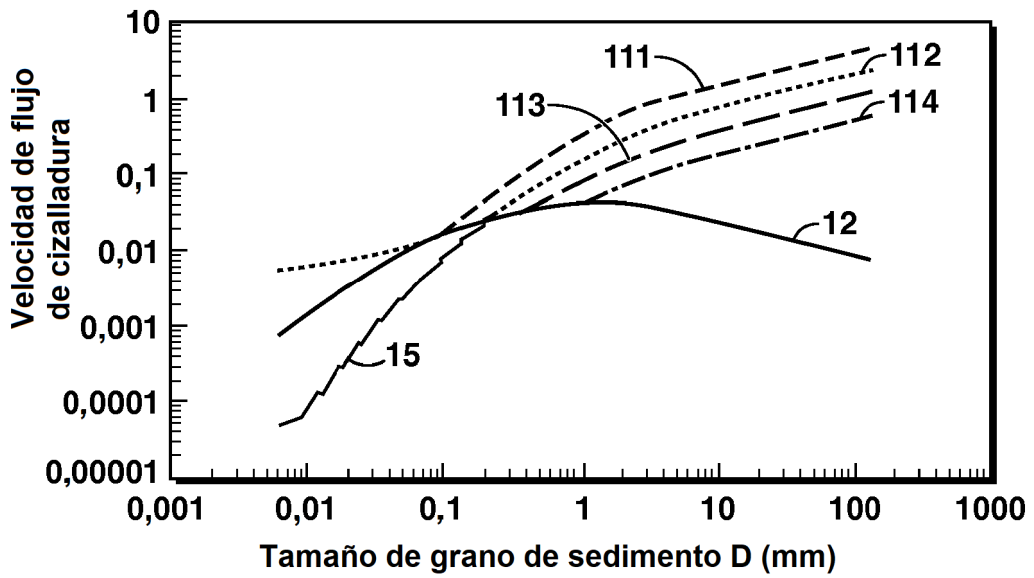
**FIG. 8**



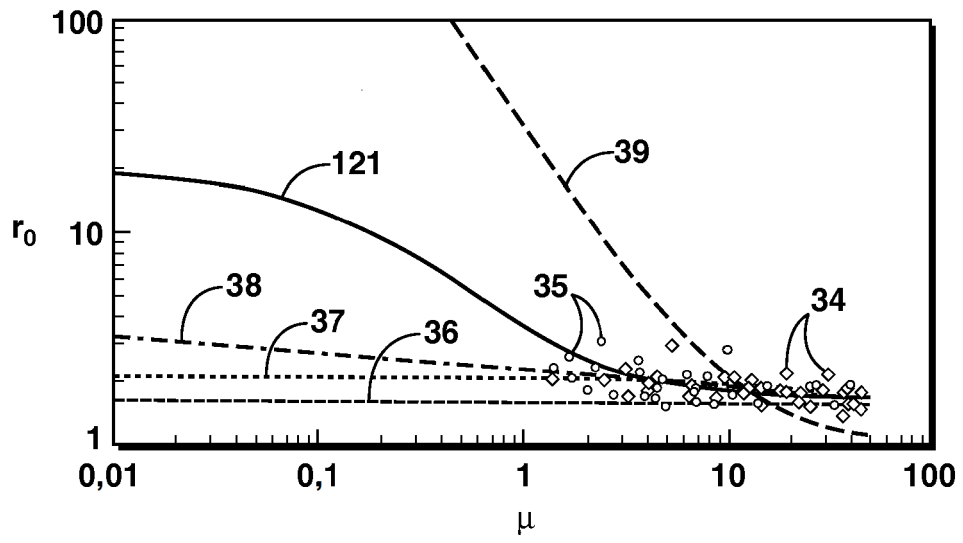
**FIG. 9**



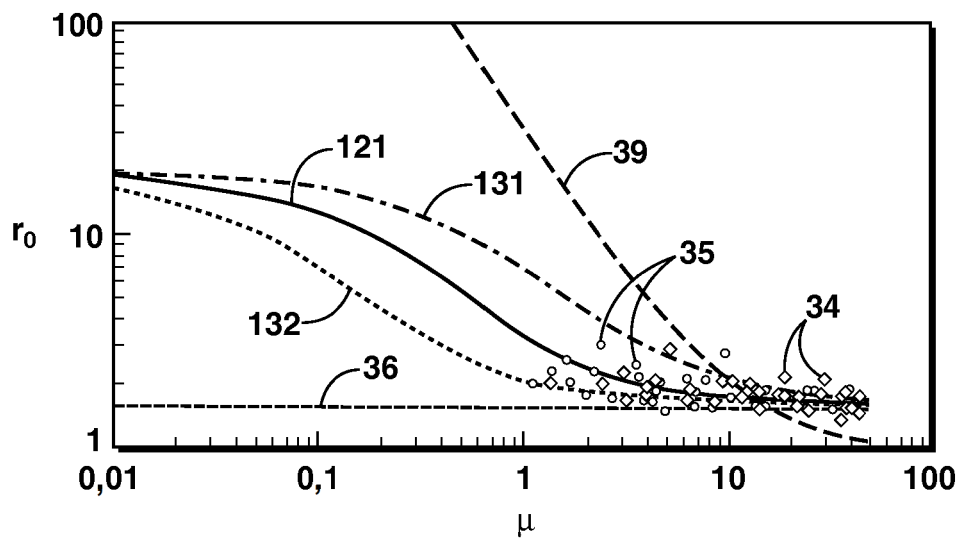
**FIG. 10**



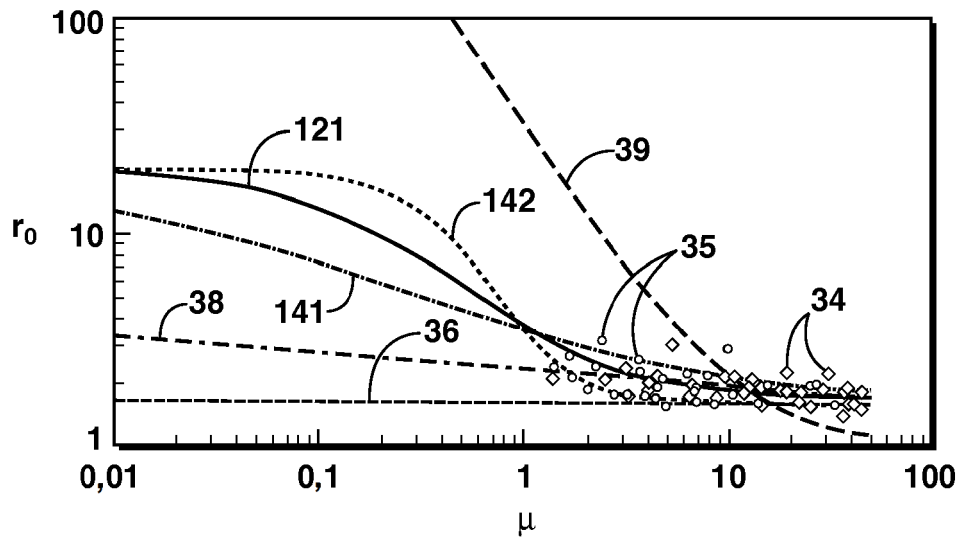
**FIG. 11**



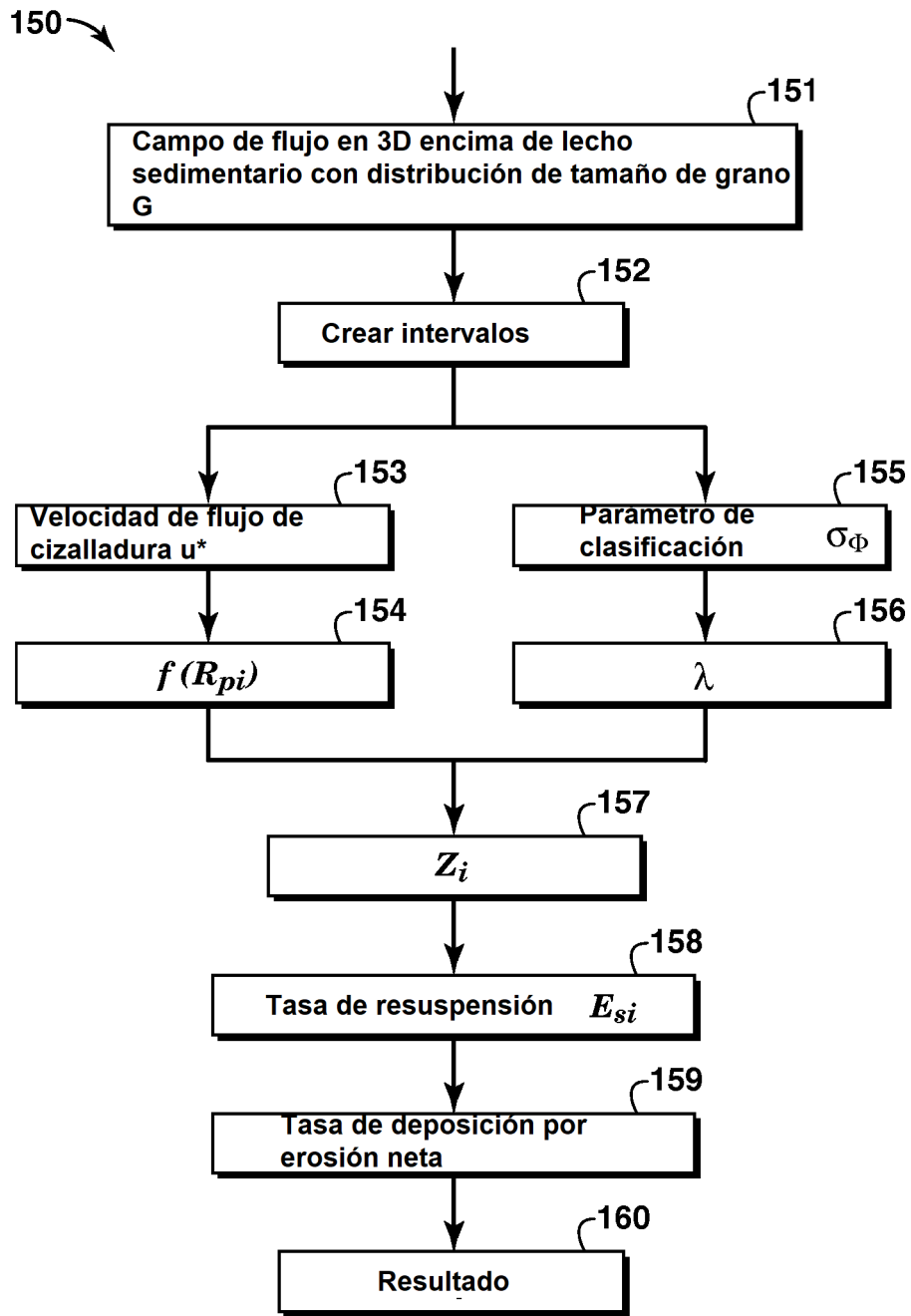
**FIG. 12**



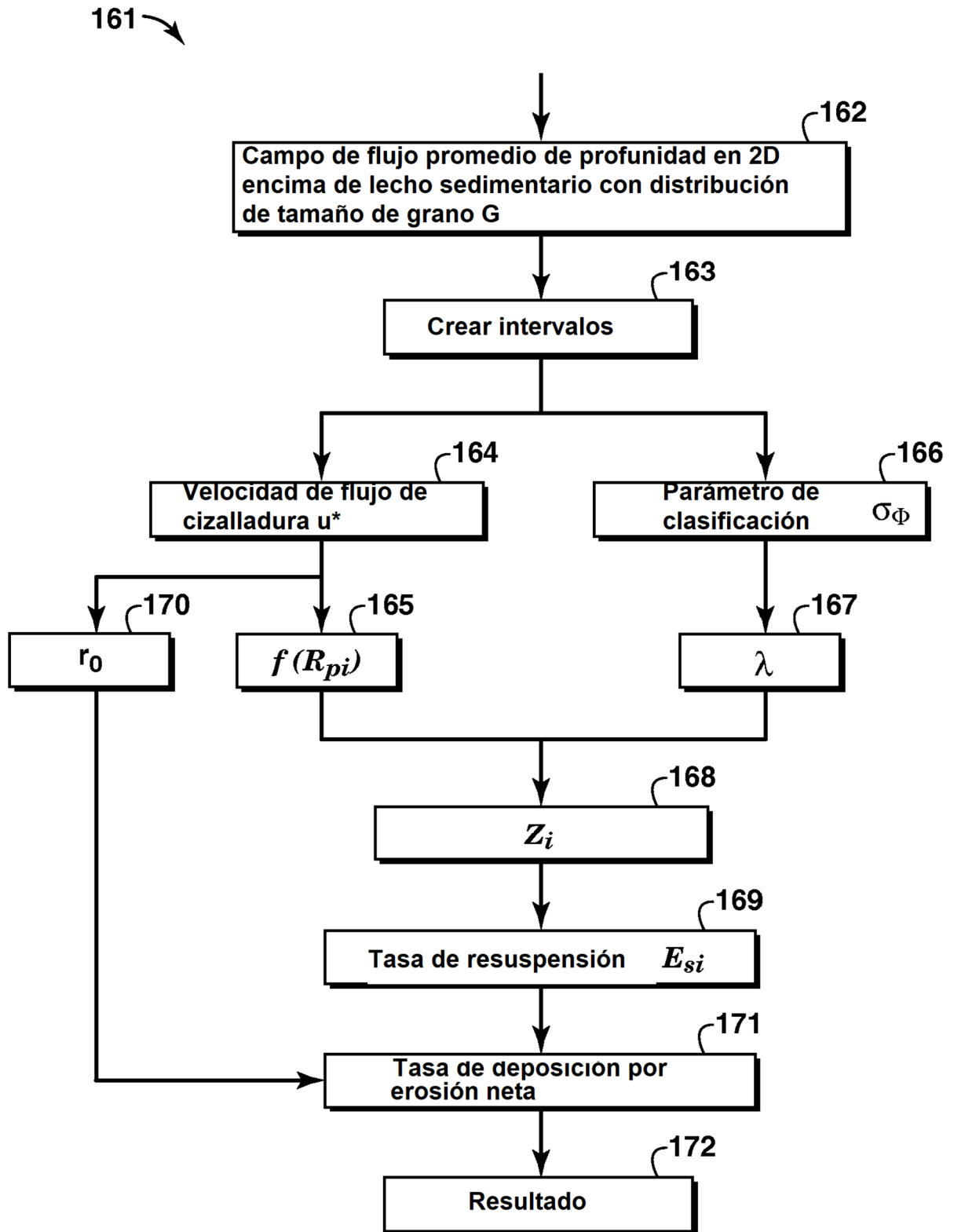
**FIG. 13**



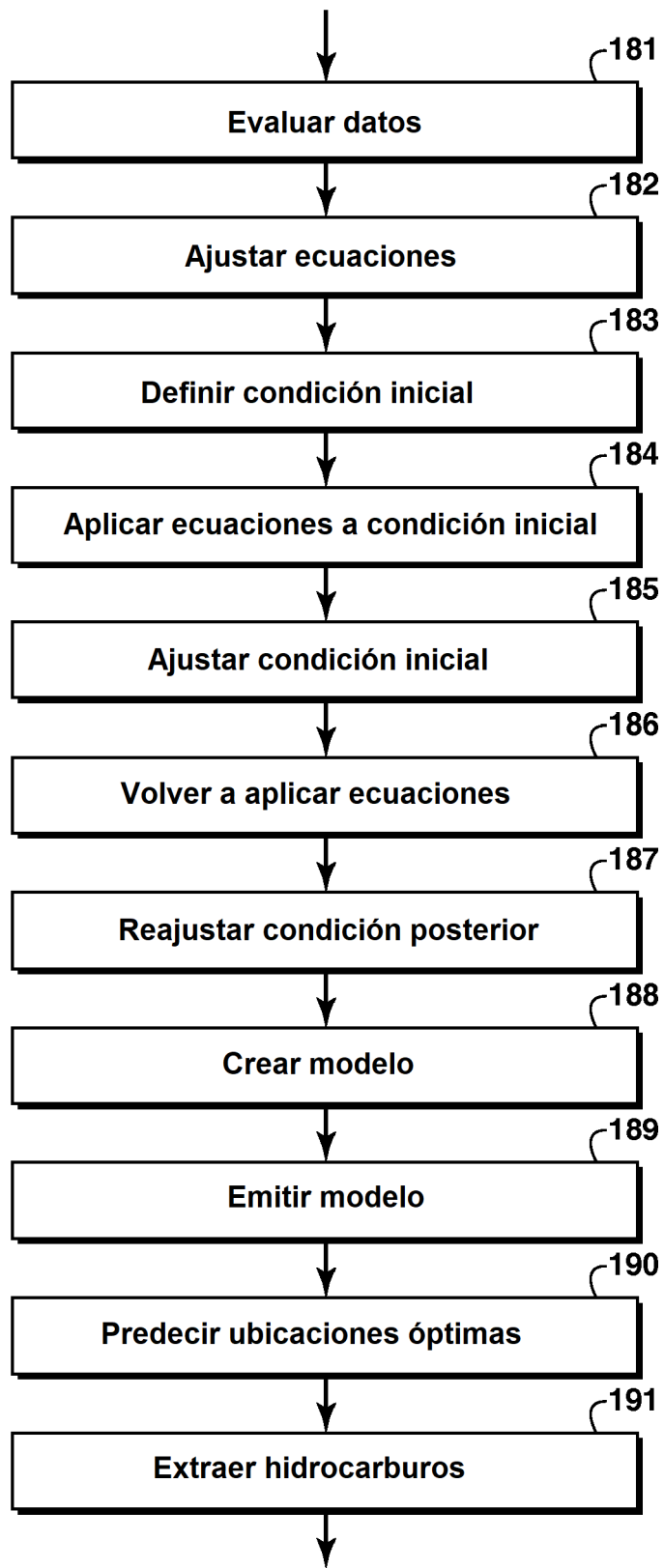
**FIG. 14**



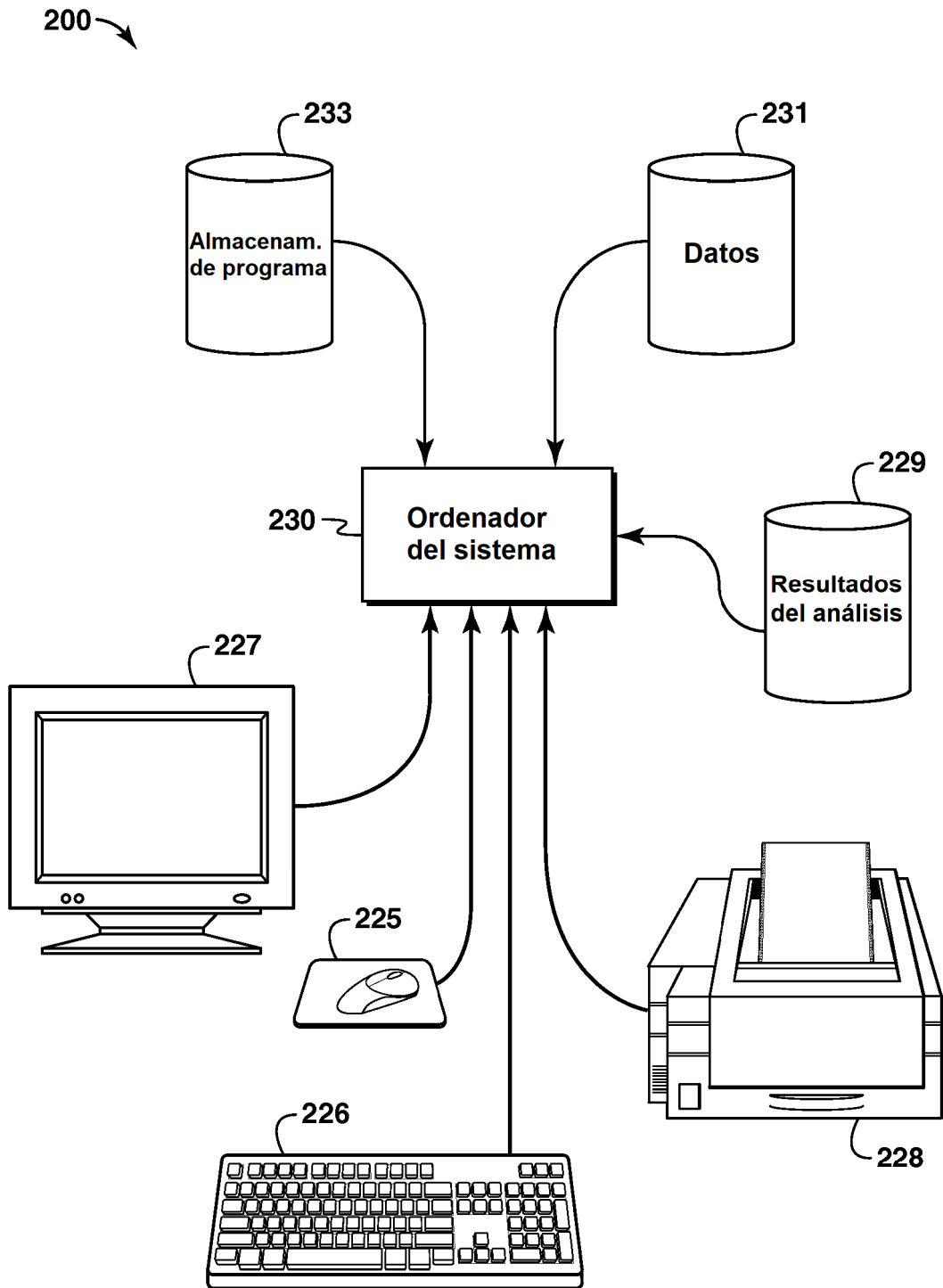
**FIG. 15**



**FIG. 16**



**FIG. 17**



**FIG. 18**