



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 268 116**

51 Int. Cl.:  
**C12Q 1/64** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **02783229 .4**

86 Fecha de presentación : **03.10.2002**

87 Número de publicación de la solicitud: **1436412**

87 Fecha de publicación de la solicitud: **14.07.2004**

54 Título: **Un método para modelizar la biodegradación de hidrocarburos en un depósito petrolífero.**

30 Prioridad: **05.10.2001 FR 01 12892**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.03.2007**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.03.2007**

73 Titular/es: **Institut Français du Pétrole  
1 & 4 avenue du Bois Preau  
92852 Rueil-Malmaison Cédex, FR**

72 Inventor/es: **Carpentier, Bernard y  
Martin, Ludovic**

74 Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 268 116 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).

# ES 2 268 116 T3

## DESCRIPCIÓN

Un método para modelizar la biodegradación de hidrocarburos en un depósito petrolífero.

### 5 Designación del campo técnico

La presente invención se relaciona con un método para modelizar la biodegradación de hidrocarburos atrapados en un yacimiento petrolífero o trampa por acción de la población bacteriana en un acuífero, a partir de datos relativos al reservorio estudiado.

10 El método según la invención permite formar una herramienta de evaluación muy útil especialmente para los geólogos preocupados por orientar las investigaciones fuera de zonas de riesgo.

### Estado de la técnica

15 La biodegradación de un aceite es un fenómeno de alteración provocada por la oxidación de ciertas moléculas hidrocarbonadas por microorganismos o flora bacteriana, que conduce a la formación de un aceite pesado y, por lo tanto, difícil de producir y comercialmente poco rentable. Las bacterias consumen estas moléculas en el marco de su respiración y para procurarse los elementos indispensables para su crecimiento y su replicación. El estudio de este fenómeno suscita interés con el desarrollo de la exploración en los grandes fondos, donde la presencia de aceite pesado es uno de los riesgos mayores. Existen actualmente pocos medios para predecir los riesgos de biodegradación y para describirla, mientras que la necesidad económica de desarrollo de herramientas cuantitativas es grande hoy en día.

25 La biodegradación es un proceso biogeoquímico emparentado con una combustión fría operada por microorganismos. Una bacteria capaz de degradar compuestos hidrocarbonados puede ser, en efecto, considerada como una máquina para consumir hidrocarburos, con ayuda de iones aceptores de electrones (pudiendo compararse con un comburente) y para rechazar un reductor.

30 Una primera condición para la existencia de la biodegradación es naturalmente la existencia de estos microorganismos. Están presentes en el medio, ya sea desde el depósito de la capa de sedimentos en superficie, ya sea porque han sido aportados por aguas meteóricas. En ausencia de materia orgánica petrolífera o de otras fuentes de carbono (CO<sub>2</sub>, iones carbonatados, etc.), las bacterias se enquistan y pueden quedar preservadas durante períodos de tiempo extremadamente largos.

35 Existen, se dice, dos mecanismos bacterianos distintos que conllevan la degradación de materia orgánica.

- 40 - El *catabolismo*, también llamado respiración. Es el proceso de descomposición de la materia orgánica por oxidación con vistas a proporcionar energía almacenada en las moléculas de ATP (TriFosfato de Adenosina). Necesita materia orgánica y aceptor de electrones (no necesariamente oxígeno). El balance químico es aún mal conocido y cambia para cada molécula hidrocarbonada.
- 45 - El *anabolismo*. Es el proceso de formación de materia celular que permite la replicación y el crecimiento bacteriano. La bacteria necesita todos los elementos que la constituyen, C, O, N, S, K y P principalmente. El conocimiento de las proporciones de cada uno de estos elementos en una bacteria proporcionaría un primer balance de su consumo relativo en el medio. El anabolismo utiliza la energía aportada por la respiración para efectuar sus reacciones químicas. El balance químico global de una bacteria que efectúa su anabolismo es, pues, una combinación del ligado a la creación de materia celular y de la respiración.

50 La respiración es un proceso permanente, mientras que el anabolismo no tiene lugar más que en ciertos momentos de la vida de la bacteria. Sólo se ha estudiado la respiración, puesto que se estima preponderante sobre el anabolismo en la degradación de los hidrocarburos. Los dos mecanismos no son, sin embargo, independientes. Cuando una bacteria realiza su proceso anabólico aumenta su respiración, puesto que necesita mucha energía.

55 La tabla siguiente da ejemplos de fuentes y aceptores de electrones, así como de los productos de las reacciones que se pueden encontrar en los reservorios petrolíferos.

Aceptores de electrones	Fuentes de electrones	Productos
O <sub>2</sub>	HC	CO <sub>2</sub>
MnO <sub>2</sub>	HC, H+	CO <sub>2</sub> , Mn <sup>2+</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HC, H+	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>

## ES 2 268 116 T3

(Continuación)

	Aceptores de electrones	Fuentes de electrones	Productos
5	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	HC, H+	$\text{CO}_2$ , $\text{Fe}^{2+}$
	$\text{SO}_4^{2-}$	HC, HC+	$\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{S}$
10	$\text{CO}_2$ eventual	HC	$\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$

Se describe un modelo conocido de biodegradación de un campo a partir de datos obtenidos del campo de Gulffaks en el mar del Norte en la publicación siguiente:

- **Horstad I., Larter S.R., Mills N.**, A quantitative model of biological petroleum degradation within the Brent group reservoir, *Org. Geochem.*, 19, pp. 107-117.

Según este modelo, se contempla el rellenado de una trampa de hidrocarburos con un flujo constante. También circula agua saturada de aceptores de electrones a flujo constante. El campo tiene una simetría paralelepípeda simple. En el curso del rellenado en la zona de transición, se calcula la destrucción de cuatro n-alcenos con ayuda de leyes cinéticas clásicas del primer orden obtenidas en laboratorio. El balance ecuacional está constituido por un término cinético de destrucción de hidrocarburo y los términos de aprovisionamiento de hidrocarburo y de aceptores de electrones por convección. La degradación es doble, aerobia y por sulfato-reducción.

En este sistema, la alimentación de aceptores de electrones el factor limitante. Los parámetros que controlan el sistema son el espesor de la zona de transición y el caudal de agua bajo la zona de transición. Los resultados obtenidos por este tipo de modelo muestran ser poco realistas. Ello depende de los balances y de las cinéticas de reacción, estando éstas ligadas al desconocimiento de la cinética bacteriana y de los mecanismos de ataque desarrollados por las bacterias.

Se utilizan habitualmente modelos que integran una aproximación más compleja del medio poroso y del transporte de materia para simular la biodegradación en las capas contaminadas poco profundas. Se trata especialmente del modelo SIMUSCOP, que permite mallar en 2D un subsuelo y calcular la biodegradación aerobia sobre los BTEX, que el solicitante ha desarrollado en base a trabajos descritos en la referencia siguiente:

- Côme, J.M. Expérimentation et modélisation de procédés *in situ* de dépollution par biodegradation aérobie des aquifères contaminés par des hydrocarbures, mémoire de thèse, pp. 75-93, Abril del 95.

Se pueden citar también el logicial BIOID desarrollado por la sociedad ECHOSCAN, RT3D o también PARSSIM1 (Universidad de Texas). Se dispone de documentación concerniente a estos modelos en las direcciones de Internet siguientes:

- Modelo BIOID:

<http://people.becon.org/-echoscan/13-22.htm>

- Modelo PARSSIM:

<http://king.ticam.utexas.edu/Groups/SubSurfMod/ColorPictures/caption.html>

- Modelo RT3D:

<http://bioprocess.pnl.gov/rt3d.descrip.htm>

También se dispone de una bibliografía concerniente a la simulación de biodegradación en el marco de la descontaminación en la dirección:

- <http://www.nal.usda.gov/wqic/Bibliographies/qb9406.html>

En la mayoría de estos modelos, no se interesa más que en las moléculas hidrocarbonadas que presentan una gran solubilidad en agua (BTEX). El aceite está allí, pues, presente en forma disuelta y no se desplaza más que por difusión. A veces, también se toma en consideración aceite residual que se desplaza por convección. Aunque las saturaciones de aceites puestas en juego no son las mismas que en un reservorio petrolífero y aunque se pone el acento sobre los transportes de materia en el acuífero, la problemática matemática es en realidad aplicable a los reservorios.

## ES 2 268 116 T3

Las ecuaciones utilizadas en todos los modelos son de la forma siguiente:

$$\frac{\partial c_{\alpha}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( V_{c_{\alpha}} - D \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial x_i} \right) + q_{\alpha} c_{\alpha} \quad (1)$$

En esta ecuación, donde  $\frac{\partial c_{\alpha}}{\partial t}$  es un término de acumulación,  $V_{c_{\alpha}}$  es un término de transporte,  $D \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial x_i}$  es un término de reacción de primer orden y  $q_{\alpha} c_{\alpha}$  es un término de fuente,

T es el tiempo,

$x_i$  es una variable espacial en x, y y z,

P es el número de especies químicas,

$V(x_i, t)$  es el campo de velocidades de un fluido (el agua),

$D(x_i, t)$  es el coeficiente de difusión,

$C_{\alpha}$  es la concentración de la especie  $\alpha$  y

$q_{\alpha}$  es el coeficiente cinético de reacción de primer orden de la especie  $\alpha$ .

El cierre del problema es asegurado con ayuda de un cierto número de condiciones iniciales y de condiciones límite, tales como las concentraciones iniciales, las zonas fuente de difusión, las zonas de transporte imposible, etc.

Para describir un medio poroso geológico, se han desarrollado modelos en 3D en los cuales se malla una zona de acuífero y se determinan en el seno de cada malla los campos de velocidad y las concentraciones.

Todos estos modelos ofrecen una descripción muy realista del medio geológico, pero no consideran más que aceites de composición poco elaborada, limitándose a varias moléculas entre las más solubles o incluso a una sola molécula hidrocarbonada tipo. Estos modelos no son, pues, utilizables *per se* para modelizar la biodegradación en los reservorios con vistas a obtener una descripción de la evolución del aceite. Además, para una aplicación a escala de tiempos geológicos, el problema sigue siendo el tipo de cinética aplicada para las reacciones de biodegradación.

### El método según la invención

El método según la invención permite modelizar la biodegradación progresiva de hidrocarburos atrapados en un reservorio petrolífero o trampa estudiado, por acción de una población bacteriana en un acuífero, a partir de datos relativos al reservorio estudiado, que se relacionan con la forma y la altura del reservorio, las características físicas del medio poroso, el espesor de la zona de transición entre los hidrocarburos y el agua, la composición de los hidrocarburos, del flujo de aceptores de electrones que entran en el reservorio y de datos sobre la población bacteriana en el acuífero, con el fin de determinar las condiciones de explotación del reservorio.

Se caracteriza por conllevar:

- la discretización del reservorio por un mallado en el cual cada malla tiene como altura el espesor de la zona de transición y

- la determinación de la variación sobre la altura de dicho reservorio, de la proporción de fracciones pesadas de los hidrocarburos bajo el efecto de la biodegradación por ajuste progresivo en el seno de cada malla de la población bacteriana a la cantidad de hidrocarburos disponible, al espacio poroso disponible y a la cantidad de aceptores de electrones presente en el reservorio y de las capacidades de degradación de dicha población.

Según un modo de realización, se determina previamente la razón de relleno inicial del reservorio de hidrocarburos cuando las condiciones de temperatura que reinan en el reservorio se prestan a la biodegradación.

Teniendo en cuenta los efectos a largo plazo de la biodegradación de los aceites de un yacimiento, el método permite hacer estimaciones mucho más realistas que con los métodos anteriores del reparto de las fracciones que componen los hidrocarburos y seleccionar mejor las zonas de explotación del yacimiento.

### Presentación sumaria de las figuras

Otras características y ventajas del método según la invención aparecerán a la lectura de la descripción que sigue de ejemplos no limitativos de realización, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, donde:

## ES 2 268 116 T3

- la Fig. 1a muestra esquemáticamente, en una trampa geológica en curso de rellenado, el desplazamiento de una zona de transición agua/hidrocarburo, teniendo lugar la biodegradación en la zona de transición que se desplaza hacia abajo a medida que se llena el campo, caso en el que el conjunto del aceite puede biodegradarse totalmente;

5 - la Fig. 1b muestra esquemáticamente otra situación en la que la biodegradación no interviene más después del rellenado de la trampa, en la zona de transición agua/hidrocarburo situada en la base del yacimiento; la biodegradación “remonta” lentamente en el reservorio y no afecta más que a la parte basal del reservorio;

10 - la Fig. 2 muestra esquemáticamente la zona de transición agua/hidrocarburo en el interior de una malla de la trampa limitada por un mallaje;

15 - las Fig. 3a, 3b muestran respectivamente de forma esquemática un medio poroso “real” y el medio poroso simplificado donde, para el cálculo de la superficie de contacto agua/aceite a la escala del poro, el conjunto del aceite presente en el poro está representado por una esfera única cuyo volumen respeta la saturación de aceite del poro;

- la Fig. 4 muestra un ejemplo de evolución de la población bacteriana calculada para el modelo en función de los tamaños de poro en un medio poroso que contiene aceite con diferentes saturaciones;

20 - la Fig. 5 muestra un ejemplo de organigrama lógico del cálculo de la población bacteriana, que se ajusta de forma que sea compatible con los parámetros petrofísicos (volumen poroso, saturación...) y la cantidad de aceptores de electrones presente en la malla a un tiempo T;

25 - la Fig. 6 muestra un ejemplo del resultado de un cálculo realizado con el modelo en el escenario 2 en que la biodegradación tiene lugar en el curso del rellenado; la variación de la composición del aceite sobre la vertical del campo, ligada a la geometría de la trampa, es claramente visible;

30 - la Fig. 7 muestra los resultados de una simulación de biodegradación con verificación de la simulación con respecto a las composiciones medidas en un caso real (América del Sur - Aceite biodegradado 1 y 2);

- la Fig. 8 muestra un organigrama lógico del cálculo de la biodegradación sobre una vertical de una trampa geológica siguiendo un primer escenario de biodegradación, y

35 - la Fig. 9 muestra un organigrama lógico análogo que permite el cálculo de la biodegradación sobre una vertical de una trampa geológica rellenada según un segundo escenario de biodegradación.

### Descripción detallada del método

40 El modelo tiene en cuenta una composición del aceite que comprende ocho clases de compuestos. A cada clase de compuesto se asocia un equilibrio estequiométrico y un factor de preferencia; de esta forma, la simulación permite seguir la evolución de composición del aceite.

45 - Utiliza una cinética de biodegradación con integración de mecanismos de ataque de las bacterias en el seno del medio poroso.

#### 1.1.1. El modelo

50 Como herramienta de puesta en práctica del modelo, se utilizan, por ejemplo, una plataforma logicial conocida llamada FLUID FOLDER, adaptada a la simulación rápida de trampas, fluidos y fenómenos de alteración: mezcla, lavado, cambio de fase, fraccionación térmica, etc.

55 En este modelo, se considera una trampa (zona porosa con una geometría curva que permite la acumulación de aceite) que se limita por un mallaje. El fluido se biodegrada en el seno de una malla situada a nivel de la zona de transición agua/aceite del reservorio (Fig. 1a, 1b). Cada malla es un paralelepípedo de base de superficie unitaria que tiene como altura el espesor de la zona de transición agua/aceite accesible por las bacterias. En el seno de cada malla (Fig. 2), el aceite tiene una saturación variable desde la base de la zona que no contiene más que agua hasta la cima de la malla, que contiene una cantidad residual de agua superior o igual a la saturación irreductible del orden del 20%. Para simplificar el cálculo, se tiene en cuenta una saturación global media en la malla.

60 Las dimensiones asociadas a la malla son:

- un tiempo de biodegradación,

65 - una saturación global de aceite,

- una composición de aceite (por el momento en 8 clases de compuestos) y

- una población bacteriana.

## ES 2 268 116 T3

### 1.1.1.1. Descripción de la trampa

Las dimensiones siguientes se asocian a la zona porosa:

- 5 - La geometría de la trampa, por ejemplo la altura y la superficie que dibuja el techo de la trampa. Se conoce por imagen sísmica obtenida según un campo de prospección sísmica de la cuenca.
- 10 - Las características del medio poroso (porosidad, tamaño de los poros, etc.). Si la trampa geológica estudiada no ha sido aún perforada, se las puede evaluar cuando se conoce el tipo de depósitos sedimentarios obtenido según estudios geológicos regionales previos. Son generalmente parámetros sensibles que influyen en la cantidad de hidrocarburos en el lugar. El modelo permite estudiar la influencia de estos parámetros sobre el aceite en el lugar. Cuando ya se han realizado perforaciones exploratorias a través de la trampa geológica, se conocen las características del medio poroso por el resultado de diagrfías o de simulacro.
- 15 - El flujo de hidrocarburos y su variación en el curso del tiempo. Se conoce o se calcula haciendo “girar” una herramienta conocida de modelización de cuenca, tal como TEMIS, por ejemplo.
- 20 - El espesor de la zona de transición. Si la trampa no ha sido aún perforada, se deduce el espesor de esta zona de las relaciones conocidas por los especialistas uniendo la presión capilar y el espesor de la zona de transición.
- 25 - la composición del aceite. Si no se dispone de medidas *in situ*, se utiliza como composición la que se obtiene haciendo girar una herramienta conocida de modelización composicional de la cuenca, tal como TEMISCOMP, por ejemplo, o bien la de un aceite perteneciente al mismo sistema petrolífero, pero no biodegradado. Se tiene en cuenta una composición con, por ejemplo, ocho clases de compuestos.
- 30 - El flujo de aceptores de electrones y su variación en el curso del tiempo. El flujo de agua en la trampa es también el resultado de una modelización por medio de un modelo de cuenca. Si la trampa estudiada no ha sido aún perforada, la composición del agua que se considera es la de una zona conocida de la cuenca sedimentaria donde se encuentra la trampa. La composición del agua puede ser también obtenida haciendo girar una herramienta conocida de simulación de diagénesis, tal como DIAPHORE, por ejemplo. Cuando ya se ha perforado la trampa, la composición del agua que se recoge es *a priori* la composición actual del acuífero.
- 35 - Informaciones generales concernientes a la adaptación de las bacterias al medio correspondiente al reservorio: tamaño medio de una bacteria, ritmo de consumo de los aceptores de electrones, factores de preferencias absolutos para las diversas clases de moléculas. Si la trampa no ha sido aún perforada, se refiere a los resultados conocidos obtenidos en laboratorio. Cuando la trampa ya ha sido perforada hasta el acuífero, se efectúan medidas bacteriológicas (muy lentas condiciones anaerobias) sobre el agua en su estado actual.

En esta trampa, se han estudiado dos escenarios geológicos posibles para modelizar la biodegradación:

#### 1.1.1.1.1. Las ecuaciones siguientes que rigen estas dimensiones en la malla son

- 45 a) las ecuaciones de equilibrio de materia que rigen la malla:
- 50 - la ecuación del equilibrio del aceite teniendo en cuenta el aceite que alimenta la malla por convección y el que se elimina por la reacción de biodegradación;
  - 50 - la ecuación del equilibrio del aceptor de electrones que alimenta la malla por difusión y convección y se elimina por biodegradación; la biodegradación está pilotada por el ritmo de consumo de la población bacteriana;
  - 55 - la ecuación que rige la población bacteriana; esta población es ajustada en función de la interfase agua/aceite, del volumen disponible y de la cantidad de aceptores de electrones.

$$60 \quad \frac{dC_1}{dt} = \left[ \frac{dC_1}{dt} \right]_{\text{convección}} - X_{\text{rel}_i}(C_i) \cdot \text{estequio}(i) \cdot \frac{d[\text{Acc}]}{dt}, \quad (2)$$

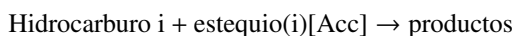
65

$$\frac{d[Acc]}{dt} = \left[ \frac{d[Acc]}{dt} \right]_{\text{difusión}} + \left[ \frac{d[Acc]}{dt} \right]_{\text{convección}} - Fa \left[ \frac{dB}{dt} \right], \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = f \left[ \begin{matrix} \Sigma C_j \\ j \end{matrix} \right] - Fb \left[ \frac{d[Acc]}{dt} \right] \quad (4)$$

En estas ecuaciones,

- [Acc] es la concentración en masa de aceptores de electrones;
- [C<sub>i</sub>] la concentración en masa del hidrocarburo i;
- B la población bacteriana (en unidades/ml);
- estequio(i) el coeficiente estequiométrico de biodegradación en la reacción que implica al hidrocarburo i:



- Xrel<sub>i</sub> el factor de preferencia relativo del hidrocarburo i.

$$Fa \left[ \frac{dB}{dt} \right] = Kcin \frac{dB}{dt}, \quad \text{función cinética de primer orden dependiente de la población bacteriana y correspondiente a su respiración.}$$

$$Fb \left[ \frac{d[Acc]}{dt} \right] =$$

$$\begin{cases} 0 & \text{si hay más aceptores de electrones} \\ & \text{que las necesidades de las bacterias} \\ \frac{1}{Kcin} \frac{d[Acc]}{dt} & \text{si no} \end{cases}$$

$f \left[ \begin{matrix} \Sigma C_j \\ j \end{matrix} \right]$  representa el número de bacterias necesarias para cubrir la interfase de una monocapa en el límite del espacio disponible (debe quedar al menos un 20% de volumen poroso libre).

## ES 2 268 116 T3

### 1.1.1.1.2. *Las clases de compuestos y sus coeficientes de preferencia*

Las clases de compuestos seleccionadas para representar el aceite son deducidas de las escalas de avance de biodegradación de Peters y Moldowan correspondientes al estado actual de los conocimientos sobre los factores de preferencia, tales como se definen en la publicación siguiente, por ejemplo:

- **Peters K.E. Y Moldowan J.M.**, "The Biomarker Guide", eds. Printice hall, 1993.

Son las siguientes por orden de preferencia de ataque:

- 1- C6-
- 2- N-parafinas C6-C15.
- 3- Isoparafinas C6-C15.
- 4- Isoprenoides C6-C15.
- 5- Naftenos C6-C15.
- 6- Aromáticos C6-C15.
- 7- Saturados C15+.
- 8- Aromáticos C15+.

Cada clase de compuestos se ve atribuir un coeficiente de preferencia absoluto y relativo.

El *coeficiente de preferencia absoluto* es la cantidad (con respecto al aceite total) de esta clase de compuesto consumida si se ponen las bacterias en situación de que tengan igual acceso a cada clase de compuesto. Este coeficiente expresa una atracción en el absoluto de las bacterias hacia las diferentes clases de compuestos.

El *coeficiente de preferencia relativo* de una clase de compuesto *i* es deducido del

$$X_{rel_i} = \frac{X_{abs_i} \times [C_i]}{\text{número\_de\_compuestos}},$$

siendo  $X_{abs_i}$  el factor de preferencia absoluto con respecto al hidrocarburo *i* coeficiente absoluto ponderado del contenido en la clase de compuesto.

$$X_{rel_i} = \frac{X_{abs_i} \cdot [C_i]}{\text{número\_de\_clase\_de\_compuestos}},$$

donde  $X_{abs_i}$  es el factor de preferencia absoluta con respecto al hidrocarburo *i*.

### 1.1.1.1.3. *Cinética bioquímica*

En primera hipótesis, las bacterias no funcionan más que en respiración. Ello significa que se omite en este modelo la fase de crecimiento de la población bacteriana en términos de tiempo de biodegradación y de cantidad de reactivos implicados en esta fase de crecimiento. Se lleva el sistema a una población bacteriana estable a cada paso de cálculo que se regenera por sí misma y que globalmente con el ambiente exterior se conduce como un simple sistema que respira.

Como ya se ha dicho, el modelo tiene en cuenta igualmente una cinética de biodegradación que es función de la población bacteriana y no solamente de los reactivos como quiere la ley de Monod especialmente. La cinética bioquímica no depende ya solamente de la cantidad de reactivos aportados por el marco geológico. La población bacteriana influye en la cantidad de reactivos en juego.

Para tener en cuenta esta cinética, se calcula la cantidad de aceptores de electrones implicados en la biodegradación que es función de la población bacteriana. Si la cantidad importada geológicamente es sobreabundante con respecto a la población bacteriana máxima, sólo una parte de esta cantidad es consumida efectivamente; si no, se considera que es enteramente consumida. Se aplica entonces una ley de tipo ley de primer orden.

### 65 *Cálculo de la población bacteriana*

Como ya se ha dicho, las bacterias tienden a asociarse en grupos biológicos y a aumentar la superficie de la interfase agua/aceite. Se plantea la hipótesis simplificadora para el modelo de que estos mecanismos están limitados

## ES 2 268 116 T3

por el volumen disponible, yendo en disminución la porosidad con la profundidad. Se considera que la población bacteriana ocupa, a escala de las gotitas en el medio poroso, la interfase agua/aceite de una monocapa.

Para calcular la población bacteriana, el medio poroso está representado por un medio equivalente más simple geoméricamente (Fig. 3a, 3b). Cada intersticio poroso es llevado a una cavidad esférica. En el seno de cada intersticio de la porosidad, el aceite a la saturación corriente se reúne en una gota esférica. Se calcula el número máximo  $N_b$  de bacterias que pueden cubrir esta superficie, sabiendo que la superficie específica  $A_b$  de cada bacteria que puede cubrir la gotita vale:

$$N_b = \text{Interfase}/A_b$$

donde  $A_b = \pi.R_b^2$ ,

siendo  $R_b$ : radio medio de una bacteria.

Este número de bacterias obtenido debe ser entonces ajustado según dos criterios:

1) *El espacio poroso libre restante (una vez contabilizado el volumen ocupado por el aceite y la población bacteriana) debe ser superior al 20%.*

Si el espacio poroso libre es inferior al 20%, entonces se ajusta la población de tal forma que el espacio poroso libre sea del 20% (el 20% es un valor arbitrario “razonable” que deja una cierta movilidad a las bacterias). En este caso, ello significa que la población bacteriana no es suficiente en número para cubrir toda la interfase. Una parte de las moléculas se disuelve entonces en el acuífero y las bacterias tendrán también interés en ocupar el acuífero para captar estas moléculas.

La figura 4 ilustra un ejemplo de aplicación donde se ha determinado como se ha indicado antes la población bacteriana para bacterias de radio medio de 1 micra. La población es calculada con una porosidad variable y una saturación de aceite también variable. Las rectas pendientes corresponden a una población que no tiene necesidad de corrección, siendo el espacio libre superior al 20%. Las rectas horizontales indican una población ajustada para obtener un 20% de porosidad. Se ve que es necesario un tamaño de poro mínimo de 100 micras aproximadamente y una saturación de aceite bastante baja para esperar tener un recubrimiento completo de la interfase.

2) *Las necesidades de las bacterias en aceptores de electrones en el curso de la duración asociada a la malla deben ser inferiores o iguales a la cantidad de aceptores de electrones aportada.*

Si la cantidad de aceptores de electrones aportada por el acuífero es inferior a la cantidad necesaria para la supervivencia del conjunto de la población compatible con la cantidad de hidrocarburos, la población bacteriana se va a reducir en un tiempo muy reducido (una sola generación de algunas horas debe bastar en la práctica) para ajustarse a la cantidad de aceptores de electrones disponible. En este caso, y este caso solamente, ello significa que al final se vuelve a un sistema cuya cinética está controlada por el aporte de aceptores de electrones y se pueden escribir los balances ecuacionales directamente con una ley de tipo Monod bien conocida por los especialistas que se basa en que la velocidad de crecimiento bacteriano varía con la cantidad de biomasa presente.

Así, este modelo desarrolla una nueva aproximación que tiene en cuenta estrategias de ataque del aceite por las bacterias y la población bacteriana presente para controlar la cinética de la reacción.

*Cálculo de la cantidad de aceite y de aceptores de electrones aportados por convección*

En el modelo, la convección es un fenómeno de flujo constante para una malla del mallaje vertical, pero puede ser variable en el relleno de la malla siguiente situada por debajo. Debido a la geometría de la trampa, si el flujo permanece constante en el relleno de varias mallas consecutivas, la cantidad de aceite y de aceptores de electrones en las mallas será variable.

La dimensión utilizada es para el aceite el volumen anual que llega a la trampa. Esta dimensión debe ser dividida por el número de mallas de las que se puede disponer lateralmente en el seno de la zona de transición, cantidad que es variable en función de la geometría de la trampa, para obtener la cantidad de aceite que llena una sola malla en cada unidad de tiempo.

En las simulaciones realizadas, el valor del caso de referencia tomado para este flujo es de 1,4 l/año; esto permite un relleno de la trampa gaussiano de 100 m de altura y 2.000 m de anchura en 100.000 años. Para los aceptores de electrones, la dimensión utilizada es la masa de aceptores de electrones que ve desfilarse un ml de agua en un año en el acuífero.

En las simulaciones realizadas para el caso tipo, se ha considerado una saturación de aceptores de electrones de 25 ppm/ml de agua. Si se considera únicamente oxígeno de masa molar 16 g/mol, esto hace para un acuífero que se desplaza 1 cm/año un flujo de 2 mg/ml de agua/año.

## ES 2 268 116 T3

### *Cálculo de la cantidad de aceptores de electrones difundidos*

La difusión se realiza verticalmente desde la columna de agua considerada como un medio infinito de concentración constante de aceptor de electrones hasta la zona de transición. La difusión crea un gradiente de concentración en el seno de la zona de transición. Para simplificar, se calcula una concentración media para toda la zona de transición.

Tal sistema está regido por la ley de Fick; la ecuación de balance es, pues:

$$\frac{\partial C}{\partial t}(z,t) = K \frac{2\Phi}{3-\Phi} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}(z,t),$$

donde K es el coeficiente de difusión y

$$\frac{2\Phi}{3-\Phi}$$

representa la tortuosidad (porosidad).

La resolución de esta ecuación da:

$$\frac{C(z,t) - CO}{C(z,0) - CO} = \operatorname{erf} \frac{z}{2 \left( \frac{2\Phi}{3-\Phi} Kt \right)^{1/2}}$$

$$\frac{C(z,t) - CO}{C(z,0) - CO} = \operatorname{erf} \frac{z}{2 \left( \frac{2\Phi}{3-\Phi} Kt \right)^{1/2}} \quad \text{con} \quad \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx$$

El cálculo del valor medio de la concentración C da:

$$\bar{C} = \frac{1}{L} \int_0^L C(z,t) dx$$

### 40 *Escenarios de relleno del reservorio*

Son posibles dos escenarios según se haga o no la acumulación de aceite en la trampa en condiciones favorables (especialmente una temperatura compatible) a los fenómenos de biodegradación.

#### 45 Escenario 1

En el primer escenario, ilustrado por la Fig. 1a, la biodegradación se produce muy pronto, desde el inicio de la fase de relleno de la trampa por el aceite, debido a que la temperatura a la profundidad de enterramiento de la trampa se presta a una acción por parte de las bacterias. La zona de transición está alimentada por aceite no biodegradado de flujo regular y por agua cargada en aceptores de electrones. El frente de biodegradación se desplaza, pues, hacia la parte baja a medida que se realiza el relleno. La geometría de la trampa ofrece a las bacterias un tiempo de relleno variable, cada vez mayor si se ensancha la trampa. Con un flujo constante de hidrocarburos, se va a crear, pues un gradiente de biodegradación en la columna de aceite. El aceite que migra hasta la trampa va a alimentar la zona de transición y el conjunto del campo. Se realiza permanentemente una mezcla entre aceite degradado y no degradado. Como se ve en la Fig. 6, la proporción de aceites pesados crece con la profundidad.

El organigrama de la Fig. 8, que permite la práctica del método en sus diferentes etapas, siguiendo el escenario 1, es el siguiente:

60 - 1 - Introducción de los datos en que necesita el modelo.

- 2 - Cálculo en función de la geometría de la trampa y del espesor de la zona de transición del número de mallas correspondiente a la altura cerrada de la trampa. Este valor es la altura de la zona cerrada dividida por la altura de la zona de transición. Se calcula un flujo entrante de hidrocarburos para cada una de las mallas; este flujo corresponde al flujo total que entra en el yacimiento dividido por el volumen total de la zona de transición a escala del campo (altura de la zona de transición \* superficie del yacimiento a la profundidad de la malla).

## ES 2 268 116 T3

- 3 - Partida del cálculo de biodegradación en la primera malla; este cálculo es un bucle que gira hasta que la porosidad en la malla se llena hasta un 80% por aceite; este cálculo tiene en cuenta los valores de flujo de hidrocarburos “frescos” y de aceptores de electrones que entran en la malla, así como la destrucción de una parte de estos hidrocarburos por las bacterias.

- 4 - Paso a la malla siguiente situada inmediatamente por debajo y retomado del cálculo de biodegradación en esta nueva malla, y esto hasta la última malla.

- El sentido de progresión de malla a la malla vecina se efectúa aquí de arriba abajo.

### Escenario 2

En un segundo escenario ilustrado por la Fig. 1b, debido a un enterramiento demasiado grande de la trampa y, por lo tanto, a una temperatura demasiado elevada, desfavorable para la actividad bacteriana, la biodegradación no ha comenzado a producirse más que en un estadio tardío de relleno de la trampa por aceite no biodegradado. Por ello, las bacterias atacan el aceite desde la base del campo en la zona de transición alimentada por el acuífero cargado de aceptores de electrones. El consumo de aceite reduce su volumen en la zona de transición, la saturación de aceite disminuye, pues, en esta zona y, por equilibrio ligado a las presiones capilares, la zona de transición se traslada hacia arriba, permitiendo que el agua y las bacterias se infiltren lentamente en el campo.

Resulta de ello que la biodegradación no se ha podido propagar en profundidad hacia lo alto de la trampa, aunque una población con frecuencia muy importante del aceite acumulado no se haya degradado. Es el caso más favorable buscado por los operadores. El método propuesto les permite seleccionar las condiciones de explotación del reservorio.

El organigrama de la Fig. 9 permite la práctica del método en sus diferentes etapas, según el escenario 2. Difiere del de la Fig. 8 esencialmente por el sentido de progresión de malla en malla, que es aquí de abajo arriba, lo que cambia los encadenamientos.

La elección del escenario 1 o del escenario 2 para tratar la trampa examinada necesita conocer las condiciones de su formación y sus desplazamientos en profundidad, que condicionan la temperatura de relleno. Se hace esta elección por los resultados de una simulación efectuada con ayuda de un modelo de depósito, tal como Témis 2 o 3D o de un modelo ID, tal como Genex.

Conociendo la composición del aceite biodegradado, utilizando un modelo de cálculo termodinámico de gas-aceite clásico, se puede calcular la densidad del aceite y restar de ella el grado API de los aceites en la trampa en función de la profundidad.

### *Validación del método sobre componentes reales*

La figura 6 muestra los resultados de una aplicación del modelo a una trampa de forma Gaussiana y la figura 7 presenta un caso de aplicación real a un campo petrolífero.

El fluido de partida es un aceite procedente de un campo de América del Sur. Este campo está biodegradado y se aportaron una serie de muestras de grado de biodegradación variable. En el seno de este campo se efectúa además la biodegradación por golpes sucesivos, siendo alimentado el sistema regularmente por pulsos de aceite fresco, degradado o no. El aceite no biodegradado se va a mezclar con el aceite degradado anteriormente.

El ejercicio consistió en ajustar los diferentes coeficientes de preferencia y estequiométricos. En el seno de cada malla, se mezcló el aceite degradado con el aceite no degradado a una razón de mezcla constante del 25% para reproducir los episodios de aceite sin degradación. Esta aproximación permitió reproducir las dos muestras biodegradadas consideradas como indica la figura 7.

Se ha descrito aisladamente el modelo de biodegradación utilizando ciertos datos obtenidos corriente arriba por medio de un modelo de depósito. Es muy evidente que la herramienta lógica que permite la práctica del modelo podrá ser ventajosamente integrada como módulo de complemento en una herramienta de modelización de depósito para beneficiarse directamente de los resultados de modelización que puede proporcionar.

**REIVINDICACIONES**

5 1. Método para modelizar la biodegradación progresiva de hidrocarburos atrapados en un reservorio petrolífero o trampa estudiado, por acción de una población bacteriana en un acuífero, a partir de datos relativos al reservorio estudiado, relativos a la forma y la altura del reservorio, las características físicas del medio poroso, el espesor de la zona de transición entre los hidrocarburos y el agua, la composición de los hidrocarburos y el flujo de aceptores de electrones que entran en el reservorio y de datos sobre la población bacteriana en el acuífero, con el fin de determinar las condiciones de explotación del reservorio, **caracterizado** por consistir en:

10 - la discretización del reservorio por un mallaje donde cada malla tiene por altura el espesor de la zona de transición y

15 - la determinación de la variación sobre la altura de dicho reservorio, de la proporción en fracciones pesadas de los hidrocarburos bajo el efecto de la biodegradación por ajuste progresivo en el seno de cada malla de la población bacteriana a la cantidad de hidrocarburos disponible, al espacio poroso disponible y a la cantidad de aceptores de electrones presente en el reservorio y de las capacidades de biodegradación de dicha población.

20 2. Método según la reivindicación 1, **caracterizado** por determinar previamente la razón de relleno inicial del reservorio en hidrocarburos cuando las condiciones, y especialmente la temperatura, que reinan en el reservorio se prestan a la biodegradación.

25

30

35

40

45

50

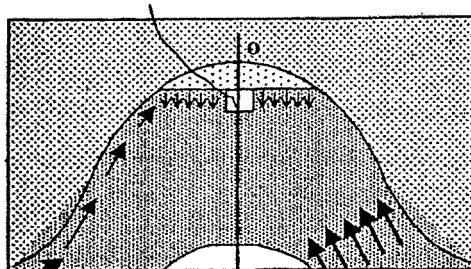
55

60

65

FIG.1A

Malla que representa la zona de transacción agua/aceite

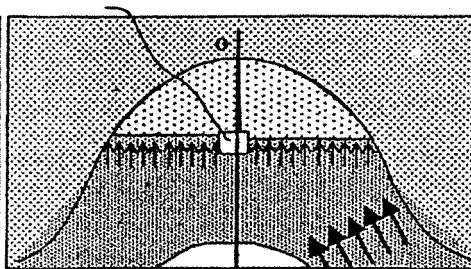


Flujo de aceite que llena el reservorio

Flujo de aceptores de electrones transportados por el acuífero

FIG.1B

Malla que representa la zona de transacción agua/aceite



Flujo de aceptores de electrones transportado por el acuífero

FIG.2

Espesor de la zona de transición agua-aceite

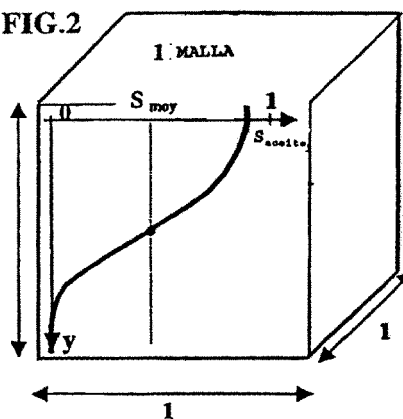


FIG.3A

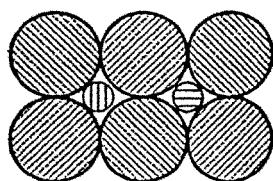
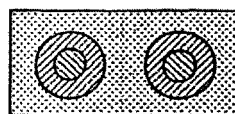


FIG.3B



\* factor de forma

FIG.4

número de bacterias en función de las condiciones geométricas del medio y de las saturaciones

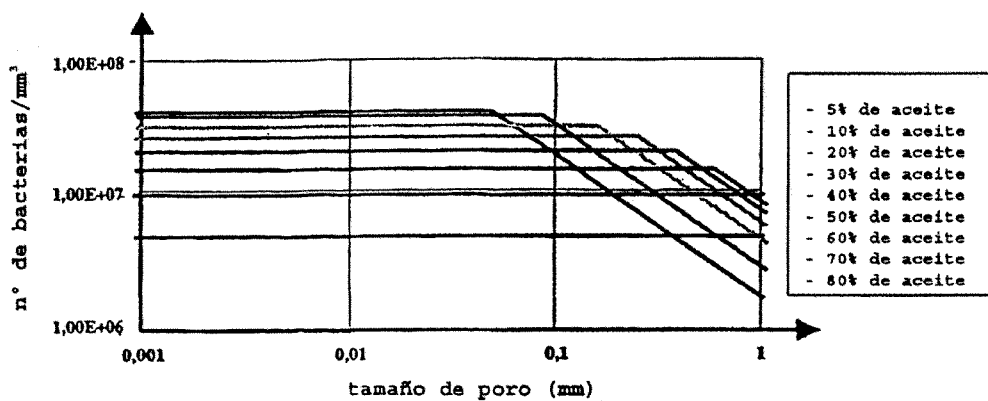


FIG.5

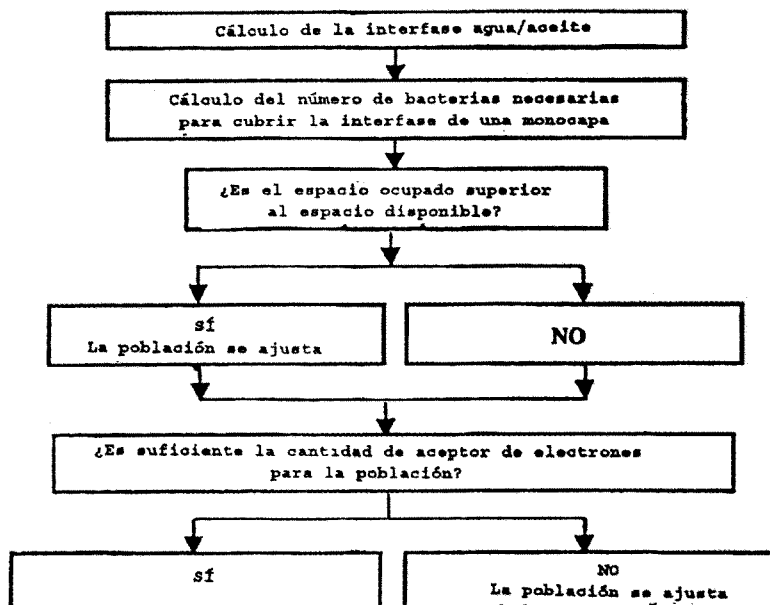


FIG.6

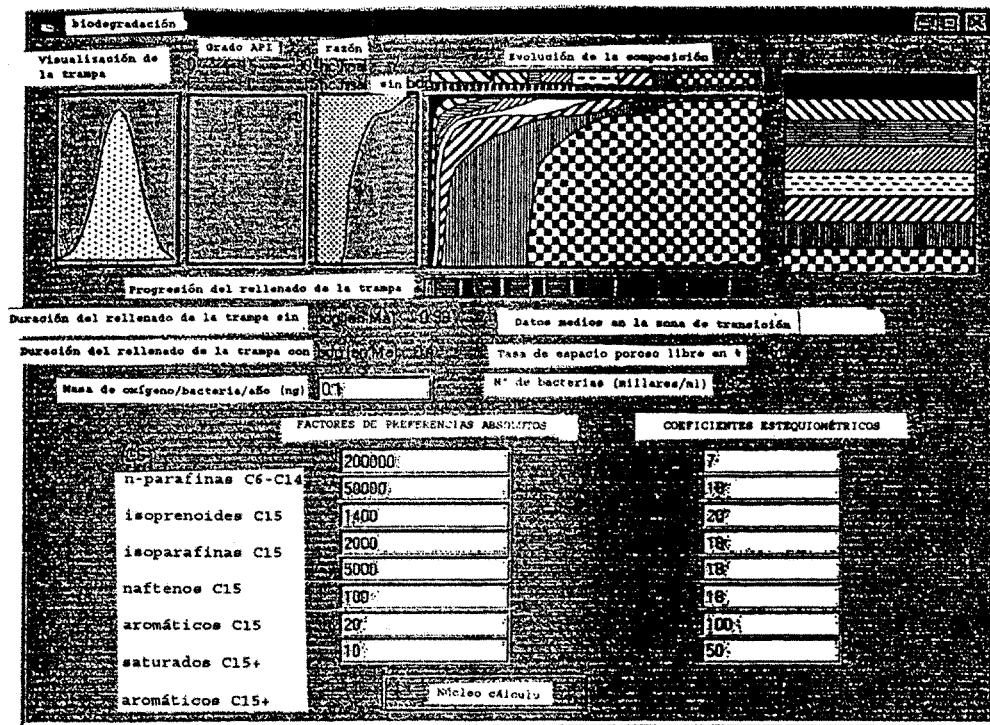


FIG.7

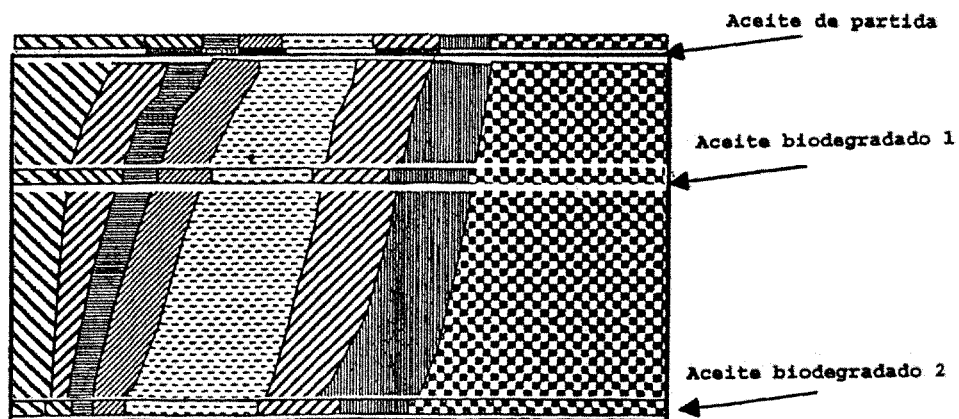


FIG.8

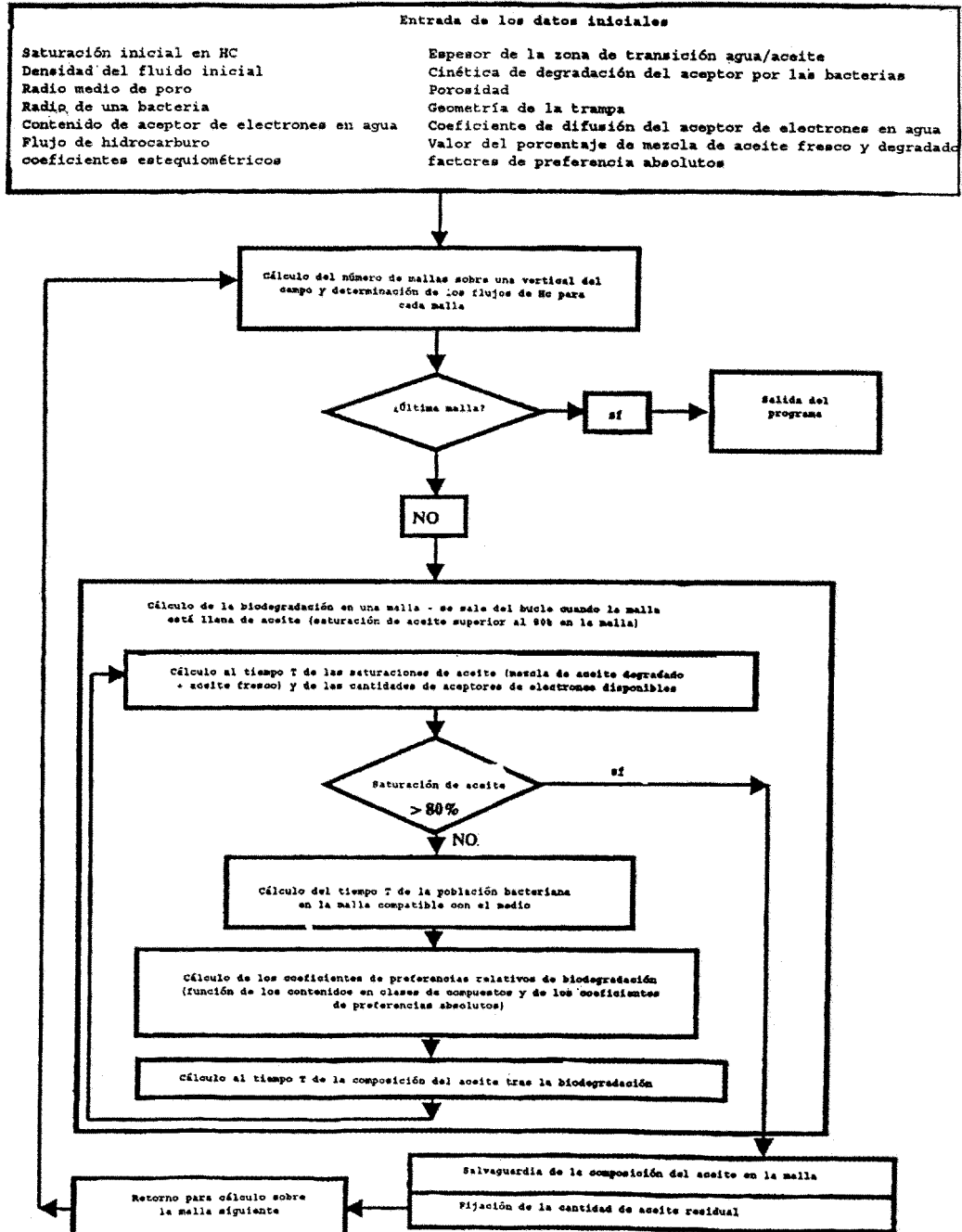


FIG.9

