

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 559 300**

51 Int. Cl.:

C09K 17/42 (2006.01)

C09K 17/00 (2006.01)

E02D 3/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.01.2013 E 13704156 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.12.2015 EP 2804988**

54 Título: **Procedimiento para la consolidación de suelos**

30 Prioridad:

16.01.2012 FR 1250397

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

11.02.2016

73 Titular/es:

**SOLETANCHE FREYSSINET (100.0%)
280 Avenue Napoléon Bonaparte
92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**ESNAULT, ANNETTE;
MOSSER, JEAN-FRANÇOIS y
BOREL, SERGE**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 559 300 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para la consolidación de suelos

5 **Ámbito técnico de la invención**

La invención concierne de forma general al ámbito de la consolidación de suelos, y de forma más particular a un procedimiento para la consolidación de suelos mediante bacterias calcificantes llevando a cabo una etapa de reciclaje de las aguas de lavado.

10

Estado de la técnica

La precipitación de los carbonatos de calcio por vía bacteriana es un fenómeno natural muy conocido: ciertas bacterias, al metabolizar un sustrato carbonado, producen un aumento de los iones carbonato y bicarbonato en el medio circundante que, combinados con los iones calcio, producen la precipitación de carbonato de calcio.

15

Esta técnica se describe particularmente en la solicitud de patente FR-A-2 644 475 que concierne a un procedimiento para la protección de una superficie artificial gracias a un revestimiento de superficie realizado *in situ* sobre dicha superficie artificial colocándola en contacto con microorganismos mineralizantes. La solicitud de patente WO 2006/066326 concierne a un método destinado a la producción de un cemento de alta resistencia en un material permeable por vía biológica; el método se basa en la utilización combinada de un microorganismo productor de ureasa, de urea y de iones calcio, siendo la cantidad de microorganismo tal que la velocidad de hidrólisis de la urea es de entre 0,5 y 50 mM de urea hidrolizada / min en las condiciones estándar. La solicitud de patente FR-A-2 873 725 concierne a un procedimiento de consolidación de suelos según el cual se utiliza una combinación de bacterias calcificantes y de bacterias desnitrificantes.

20

25

Por otro lado, los modos de fijación de las bacterias sobre los soportes que van a ser calcificados se describen, por ejemplo, en la solicitud de patente WO 2007/069884, que concierne a un procedimiento para la inmovilización de las bacterias en un material permeable a dichas bacterias, basado en la floculación de las bacterias mediante la adición de un agente de floculación; y en la solicitud de patente FR-A-2 911 887, que concierne a un modo de preparación de biomasa destinado a la estimulación de la producción de exopolisacáridos con el fin de favorecer la fijación de las bacterias en la arena.

30

Los suelos finos o licuefactables tienen una permeabilidad muy baja, del orden de 10^{-5} m/s. La consolidación o la estanqueidad de dichos suelos implica la inyección de soluciones cuyo tamaño máximo de los granos que contienen debe ser inferior a un micrómetro. El interés de las bacterias calcificantes es que pueden penetrar profundamente en los suelos a través del medio de cultivo en el que están, y vivir siempre que se les aporten nutrientes y hacer crecer los carbonatos en la superficie de los granos de suelo, manteniendo una porosidad abierta si fuera necesario.

35

Sin embargo, las bacterias calcificantes producen compuestos nitrogenados que son rechazados por el medio circundante. La gestión de estos "rechazos" es necesaria para que el procedimiento sea ecológicamente aceptable. Este aspecto únicamente es abordado, según el conocimiento de la Demandante, en la solicitud de patente FR-A-2 873 725, que propone una solución de tratamiento de los compuestos nitrogenados por parte de bacterias desnitrificantes. Esta solución no es, no obstante, muy satisfactoria desde un punto de vista práctico, ya que su puesta en práctica es técnicamente pesada y cara.

40

45

Otros inconvenientes están relacionados con las restricciones operativas. En efecto, el tiempo de puesta en práctica puede variar considerablemente de un sitio a otro, o en un mismo sitio. Ésta necesita la adaptación de un organigrama de inyección en particular para poder gestionar los tiempos de detención o de espera en la obra, que pueden variar desde varias horas hasta algunos días. Existe por lo tanto un riesgo de que las bacterias pierdan su actividad durante estos tiempos de espera.

50

De forma más general, la técnica actual no permite, o lo permite insuficientemente, la adaptación de las características de la biomasa en el transcurso de la obra, en función de las condiciones de puesta en práctica (naturaleza del terreno que se va a tratar, duración de vida de las bacterias, permeabilidad del macizo que se va a tratar) para ajustarse a la esperanza de vida de las bacterias.

55

Por lo tanto, es deseable poder disponer de un procedimiento de consolidación de suelo compatible con las condiciones de la obra y que permita una gestión flexible de las características de la biomasa.

60

Igualmente es deseable que el procedimiento en cuestión respete el entorno, permitiendo un tratamiento simple de los compuestos nitrogenados producidos por las bacterias calcificantes; dicho procedimiento debería presentar igualmente unas ventajas económicas.

65

Breve descripción de las figuras

- La figura 1 representa la evolución con el tiempo del índice de lisis celular de una solución bacteriana utilizada en el ámbito de la invención.
- 5 La figura 2 representa la relación entre la actividad enzimática (AE) total y la concentración de liofilizado.
- La figura 3 A representa la productividad de NH_4^+ en función de la concentración de liofilizado.
- La figura 3 B representa la productividad de NH_4^+ en función de la AE total.
- La figura 3 C representa la velocidad de hidrólisis en función de la concentración de liofilizado.
- La figura 4 representa un esquema general de la puesta en práctica del procedimiento de la invención.
- 10 La figura 5 representa una vista en sección de una puesta en práctica del procedimiento de la invención.
- Las figuras 6 y 7 representan una vista cenital de la figura 5.

Descripción de la invención

- 15 Según un primer aspecto, la invención tiene por objeto un procedimiento de consolidación de suelos mediante la inyección de bacterias calcificantes que no necesita unas instalaciones importantes ni costosas para la preparación de las soluciones de bacterias que deben ser inyectadas.

- 20 Según otro aspecto, la invención tiene por objeto un procedimiento de consolidación de suelos mediante la inyección de bacterias calcificantes que comprende un lavado del suelo, en el que las aguas de lavado pueden ser reutilizadas, particularmente para la preparación de las soluciones utilizadas para el tratamiento de consolidación.

- 25 Según otro aspecto, la invención tiene por objeto un procedimiento de consolidación de suelos mediante la inyección de bacterias calcificantes en el que los compuestos nitrogenados producidos por dichas bacterias son tratados de una forma simple y respetuosa con el medio ambiente.

Estos objetos son conseguidos mediante el procedimiento según la invención para la consolidación de suelos *in situ*, que comprende las siguientes etapas:

- 30 a) la inyección de una solución de bacterias calcificantes, preparada a partir de bacterias en polvo, en el volumen de suelo que se va a tratar;
- b) la inyección de una solución calcificante;
- c) el lavado con agua del volumen de suelo tratado;
- d) la medición de la concentración de iones amonio en el agua de lavado y en el suelo tratado;
- 35 e) el reciclaje del agua de lavado.

En una primera etapa, el procedimiento según la invención comprende la inyección de una solución de bacterias calcificantes en el volumen de suelo que se va a tratar.

- 40 Una bacteria calcificante es ventajosamente una bacteria que permite un aumento de los iones carbonato y bicarbonato en el medio circundante, particularmente mediante la metabolización de un sustrato carbonado, para obtener la precipitación de carbonato de calcio en presencia de calcio. Ventajosamente se utiliza una bacteria que tenga una actividad ureásica o ureolítica. Una bacteria calcificante preferida es *Sporosarcina pasteurii*.

- 45 La solución de bacterias calcificantes se prepara extemporáneamente en el sitio que se va a consolidar, mediante la rehidratación de las bacterias en polvo. Dicha forma en polvo puede ser obtenida mediante una etapa de secado apropiada, tal como una liofilización, una atomización u otra técnica, de una biomasa líquida previamente preparada industrialmente. La utilización de bacterias en polvo permite la preparación en obra según las necesidades y también permite evitar la utilización de un biorreactor, ya que ya no es necesario el cultivo de las bacterias en el sitio.
- 50 Durante la rehidratación, es preferible la utilización de un agua con una fuerza iónica suficiente favorable para la estabilidad de las bacterias, tal como ciertas aguas de abastecimiento lo suficientemente mineralizadas, con el fin de evitar una lisis precoz en las primeras horas que siguen a la hidratación. Igualmente es posible la utilización de un agua de lavado resultante de la puesta en práctica del procedimiento de la invención, en la medida en que la concentración de iones amonio en este agua sea inferior a 50 g/l. La figura 1 muestra que una rehidratación de las bacterias
- 55 *Sporosarcina pasteurii* en polvo en una solución de cloruro de amonio a 10 g/l retarda de forma significativa la lisis celular en comparación con un agua de abastecimiento de mineralización débil.

- De forma convencional, la solución de bacterias calcificantes comprende los nutrientes necesarios para asegurar su supervivencia; esta solución puede comprender igualmente otros ingredientes tales como los descritos en la solicitud de patente FR-A-2 911 887. Así, la solución de bacterias calcificantes puede contener un agente de adhesión, añadido durante o después del cultivo de las bacterias, antes de la liofilización, o bien añadido durante la rehidratación de las bacterias en polvo.
- 60

- Como se explica con más detalle en el ejemplo 2, se ha establecido que, de forma inesperada, existe una relación lineal entre la productividad de NH_4^+ en las primeras cuatro horas de hidratación y la concentración inicial de liofilizado de bacterias, de forma que es posible ajustar el nivel deseado de hidrólisis de la urea.
- 65

La solución de bacterias calcificantes se inyecta típicamente en el suelo, por gravedad o bajo presión, por medio de perforaciones de alimentación. Ventajosamente se prevé una alimentación mediante la circulación de la solución de bacterias calcificantes. Esta circulación puede estar asegurada por la intermediación de perforaciones de alimentación, de perforaciones de bombeo o de captación. Estas técnicas comprenden ventajosamente medios de control de la evolución del tratamiento para adaptar éste último, y particularmente se describen en la solicitud de patente FR-A-2 873 725.

La solución de bacterias calcificantes es inyectada de forma que se obtenga una cierta velocidad en el terreno, comprendida típicamente entre 20 y 100 cm/h. La impregnación de las bacterias se controla mediante el seguimiento de la densidad óptica (cotéjese el documento FR-A-2 873 725) y mediante el seguimiento de la actividad enzimática.

En una segunda etapa, el procedimiento según la invención comprende la inyección de una solución calcificante.

Se entiende por solución calcificante una solución que permite la generación de carbonato de calcio, CaCO_3 , en presencia de bacterias calcificantes. Típicamente, la solución calcificante comprende urea y calcio; la concentración equimolar de esta solución está comprendida ventajosamente en el intervalo de entre 0,1 M y 1,7 M.

La solución calcificante puede comprender un agente de adhesión tal como el descrito en la solicitud de patente FR-A- 2 911 887.

La solución calcificante es inyectada en el terreno que se va a tratar a una velocidad comprendida entre 20 y 100 cm/h. La evolución de la precipitación de calcita se sigue mediante la medición de la concentración de iones NH_4^+ (estos iones se producen durante la hidrólisis de la urea: la estequiometría indica la formación de dos moles de NH_4^+ por mol de urea hidrolizado); en función de los resultados obtenidos, es posible inyectar de nuevo la solución calcificante para completar el tratamiento. Según una variante, se inyecta una solución calcificante con una concentración diferente a la de la primera. La inyección, y dado el caso, la alimentación mediante circulación, de la solución calcificante, pueden llevarse a cabo como se ha descrito anteriormente para la solución de bacterias calcificantes.

Una vez conseguida la calcificación de las bacterias, el procedimiento según la invención comprende, en una tercera etapa, el lavado con agua del suelo consolidado. El problema que presenta la utilización de la vía ureolítica para la carbonatación es la gestión y la eliminación de los iones NH_4^+ formados. En efecto, generalmente no se puede contemplar por razones medioambientales y ecológicas, *in situ* unas concentraciones molares - o supramolares. Por ejemplo, la hidrólisis de un mol de urea conduce a la formación de una solución de amonio a 36 g/l, mientras que la concentración admisible para un agua potable es de 40 $\mu\text{g/l}$. La extracción de la solución de amonio es ciertamente posible mediante bombeo. No obstante, el retorno a unas concentraciones admisibles *in situ* necesita la utilización de grandes volúmenes de agua para llevar a cabo lavados sucesivos (igualmente denominados « flushs »). De forma convencional, estas aguas de lavado se recuperan para ser dirigidas hacia una planta de tratamiento. El propio procedimiento según la invención permite la reutilización de las sucesivas aguas de lavado.

Para llevar esto a cabo, el procedimiento según la invención comprende, en una cuarta etapa, la medición de la concentración de iones NH_4^+ en el agua de lavado. Una vez determinada esta concentración, el agua de lavado se reutiliza, en una quinta etapa, en la obra, para poner en práctica el procedimiento según la invención en otras porciones del suelo que se va a consolidar. En función de la concentración de iones NH_4^+ en el agua de lavado, esto último puede servir:

- bien para la rehidratación de las bacterias calcificantes en polvo;
- bien para la preparación de las soluciones calcificantes,
- bien para el lavado del suelo (y por lo tanto, para evitar tener que recurrir al agua de abastecimiento).

De forma general, cuando la concentración de iones NH_4^+ medida es superior o igual a 20 g/l, el agua de lavado se trata de forma que se obtenga una concentración de iones NH_4^+ inferior a 1 g/l. El agua así obtenida es dirigida hacia una unidad de almacenamiento y típicamente puede ser reutilizada para posteriores ciclos de lavado. Algunos medios apropiados para llevar a cabo dicho tratamiento comprenden, por ejemplo, una unidad de concentración, particularmente una unidad de concentración a vacío (evapoconcentración). En este modo de realización, el sólido obtenido a la salida de la fase de concentración (NH_4Cl) podrá ser reutilizado, por ejemplo, como fertilizante, o para la preparación de urea. En el marco de la invención podrá llevarse a cabo cualquier otro medio de concentración, como por ejemplo, técnicas de cristalización o de precipitación.

Sin embargo, en función del estado de avance de la obra en la que se pone en práctica el procedimiento, es posible la utilización de un agua de lavado que tenga una concentración de iones NH_4^+ comprendida en el intervalo de entre aproximadamente 5 g/l y aproximadamente 50 g/l, preferiblemente en el intervalo de entre aproximadamente 20 g/l y aproximadamente 50 g/l, más preferiblemente en el intervalo de entre aproximadamente 20 g/l y aproximadamente 30 g/l, para la rehidratación de las bacterias calcificantes en polvo.

Quando la concentración de iones NH_4^+ es inferior a 20 g/l, el agua de lavado es dirigida directamente hacia una unidad de almacenamiento de agua para que sea utilizada de la siguiente forma:

- 5 - si la concentración de iones NH_4^+ está comprendida entre 1 y < 20 g/l, el agua de lavado puede servir para la preparación de una solución de bacterias calcificantes o para la preparación de soluciones calcificantes;
- si la concentración de iones NH_4^+ es inferior a 1 g/l, el agua de lavado puede servir para otros ciclos de lavado.

De forma ventajosa, la etapa de lavado del suelo se repite hasta la obtención de un agua de lavado cuya concentración de iones NH_4^+ sea inferior a 0,1 g/l. En este supuesto, el agua de lavado puede ser vertida directamente en el medio natural (por ejemplo, en cursos de agua o en desagües) o evacuada hacia una estación de depuración, dependiendo de las restricciones normativas del país en el que se realiza la obra.

En un modo de realización de la invención, el suelo que se va a consolidar se divide en parcelas o bloques, preferiblemente en parcelas o bloques con un volumen sensiblemente igual. En este modo de realización, las aguas de lavado obtenidas después del tratamiento de la primera placa son reutilizadas para la preparación de todas o de parte de las soluciones necesarias para el tratamiento y/o el lavado de la(s) parcela(s) restante(s), según las indicaciones proporcionadas anteriormente.

Así es posible aprovechar las aguas de lavado mediante la creación de un bucle de circulación que permite reducir de forma significativa la cantidad de agua total utilizada. Así, en el ejemplo proporcionado a continuación, se ha podido reciclar aproximadamente el 60 % de volumen del agua utilizada. Esto es muy ventajoso desde un punto de vista medioambiental y económico: el coste de aprovisionamiento de agua es reducido; el volumen de agua que se tiene que almacenar y/o tratar antes del vertido es reducido; el agua del último lavado contiene una cantidad (muy) baja de iones amonio, y puede ser tratada de nuevo con un bajo coste.

La invención se ilustra mediante los siguientes ejemplos, proporcionados a título puramente indicativo. En estos ejemplos, se utilizan las siguientes expresiones y abreviaturas:

AE: actividad enzimática

AE_{tot}: actividad enzimática total

30 Biomasa: solución que contiene las bacterias calcificantes

DO: densidad óptica

Flush: lavado

Soluciones calcificantes 1 y 2: soluciones equimolares (1,1 M) de urea y de calcio

35 Tiempo de lote: tiempo de reposo durante el cual se detiene la inyección para permitir que se produzca la reacción

Volumen de poros (VP): volumen de los vacíos de un medio poroso con un volumen V

Ejemplo 1: lisis celular en función del tiempo

40 Cuando las bacterias se someten a la liofilización, su estructura y/o su fisiología queda a menudo muy alterada. Esto se traduce, en el momento de su rehidratación en el agua de abastecimiento urbano, en la aparición más o menos rápida de una lisis celular y/o en una disolución de su actividad enzimática intracelular.

Se ha ensayado la influencia de la adición de cloruro de amonio durante la rehidratación de las bacterias *Sporosarcina pasteurii* liofilizadas, según el siguiente protocolo.

45 Se añaden 78 mg de polvo de liofilizado a 100 ml de agua de abastecimiento urbano que contiene 10 g/l de NH_4Cl . El liofilizado se deja rehidratar a la temperatura ambiente durante 5 min con agitación. Se controla la evolución del índice de células lisadas en función del tiempo mediante la medición de la densidad óptica a 600 nm (DO_{600}), mediante la fijación de T_0 después de 5 min de rehidratación. La DO_{600} se lee durante las 6 primeras horas, y 50 después a las 24 h y a las 26 h.

Como comparación (« blanco ») se lleva a cabo el mismo experimento con agua de abastecimiento urbano que no contiene NH_4Cl .

55 La DO_{600} únicamente cuantifica las células completas. Aunque la concentración de liofilizado siempre sea la misma, las DO_{600} a T_0 son ligeramente diferentes. Las variaciones en el transcurso del tiempo son por lo tanto difícilmente comparables. Es por ello que se homogeneizan los resultados expresándolos como el % de células lisadas.

60 La figura 1 representa la evolución del índice de células lisadas en función del tiempo. La interpretación de las curvas pone en evidencia un perfil común que puede ser descompuesto en dos partes:

- la primera se corresponde con una lisis más o menos rápida de las células,
- la segunda con la aparición del estado de equilibrio.

65 Así, cuando el liofilizado es rehidratado con agua de abastecimiento urbano, en 6 horas de contacto se lisa el 67 % de las células. Sólo queda aproximadamente un 15 % de células completas, que se mantienen hasta las 24 o las 26

h. La adición de 10 g/l de NH₄Cl protege las estructuras celulares, ya que se constata una ausencia de lisis al cabo de 4 h y un 60 % de células no lisadas a las 24 h.

Ejemplo 2: correlación entre la productividad de nitrógeno amoniacal del liofilizado y la concentración de biomasa

Medición de la actividad enzimática

Se ponen en suspensión 0,3 g de polvo de liofilizado de *Sporosarcina pasteurii* en 16 ml de agua para formar un primer frasco identificado como « puro » con una concentración de 18,75 g/l. Esta dosis de partida se ha calculado con el fin de que se sitúe alrededor de una actividad enzimática de 8.000 S/min. A continuación se llevan a cabo diluciones de 1/2 hasta una dilución de 1/128e.

Se colocan 27 ml de urea 1,1 M y 3 ml de muestra de cada dilución en un vaso de precipitados de 50 ml (cada muestra se ha diluido por tanto 10 veces en la urea). La temperatura se mantiene a 20 °C. Se controla la conductividad cada minuto durante 6 minutos. La AE se corresponde con la pendiente de la recta que representa la conductividad en función del tiempo, y se expresa en μS/min que se multiplica por 10 (factor de dilución). Los resultados están representados en la tabla 1.

Tabla 1

Dilución	Puro	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128
[liofilizado] (g/l)	18,750	9,375	4,688	2,344	1,172	0,586	0,293	0,146
AE _{tot} (μS/min)	14.069	7.095,7	4.277,1	2.479	1.188,1	545,4	113	46,7

La figura 2 muestra que la relación entre la AE total y la concentración de liofilizado es una relación de tipo lineal con la siguiente ecuación:

$$AE_{tot} (\mu S/min) = 763,59 \times [liofilizado] (g/l); R^2 = 0,993$$

Medida de la productividad de NH₄⁺ a lo largo de 4 horas

Para cada dilución de liofilizado se ha determinado la evolución con el tiempo de la concentración de NH₄⁺. Se han tomado muestras a T₀, a T₀ + 1 h, a T₀ + 2 h, a T₀ + 3 h y a T₀ + 4 h para su dilución en las proporciones adecuadas. A continuación se han introducido 2 ml de estas diluciones y 0,1 ml de reactivo de Nessler en una cubeta de espectrometría adaptada. Después de 1 minuto se ha medido la DO a 425 nm. La concentración de NH₄⁺ se calcula según la ecuación que relaciona la DO con la concentración de NH₄⁺ de la muestra, restando la DO leída de la de un blanco de agua. Para el aparato utilizado durante los experimentos, la fórmula es la siguiente:

$$[NH_4^+] (mM) = (DO_{425} \times dilución) / 2,337$$

El conjunto de los resultados se presenta en la siguiente tabla 2.

Tabla 2

Dilución	Puro	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128
[liofilizado] (g/l)	18,75	9,38	4,69	2,34	1,17	0,59	0,29	0,15
AE total (μS/min)	14.069	7.095,7	4.277,1	2.479	1.188,1	545,4	113	46,7
Productividad (mmol/l/h)	/	5.625,4	3.929,5	2.439,5	1.218,4	602,45	244,62	56,265
Velocidad de hidrólisis (mmol de urea/l/min)	/	46,88	32,75	20,33	10,15	5,02	2,04	0,47

Las productividades medidas en las cuatro primeras horas son proporcionales a las concentraciones de liofilizado utilizadas y a las actividades enzimáticas iniciales, como se indica en las figuras 3 A y 3 B.

Estas dos gráficas ilustran la flexibilidad ofrecida por la utilización de las bacterias en forma de polvo en el sitio, y por la elección de la dilución de la biomasa en función de la productividad buscada. En efecto, a partir de esta productividad, es posible la determinación de la actividad enzimática correspondiente y la concentración de bacterias que se van a utilizar en la biomasa. El control de la actividad enzimática es una medida simple que se puede poner en práctica en el sitio, ya que se lleva a cabo en 6 minutos.

A partir de la medición de la productividad, igualmente es posible la obtención de las velocidades de hidrólisis de la urea en las cuatro primeras horas, como se indica en la figura 3 C. Es notable que en el intervalo habitual de utilización del liofilizado, de hasta aproximadamente 5 g/l, las velocidades de hidrólisis medidas durante 4 h alcanzan unos valores del orden de 35 mM urea / min.

Mediante la utilización de la relación proporcionada en la solicitud de patente WO 2006/066326 (urea hidrolizada (mM) = 11,11 x conductividad (mS)), se obtiene una velocidad de hidrólisis del orden de 100 mM/min para un valor de la AE_{tot} de 4.277 μ S/min (cotéjese la tabla 2, dilución de ¼). Es interesante comparar este valor con el valor máximo proporcionado en el documento WO 2006/066326 de 50 mM de urea / min.

5

Ejemplo 3: tratamiento del suelo

El procedimiento según la invención se ha puesto en práctica en un terreno de 6 m x 12 m. Los suelos presentes están constituidos por aluviones del Ródano modernos sobre una capa de aluviones antiguos más compactos (cotéjese la figura 5). Los aluviones modernos son arenas sueltas, más o menos limosas, muy sensibles a la licuefacción en caso de sismo.

10

El objetivo del tratamiento es la mejora de la cohesión de las arenas sueltas con el fin de reducir el riesgo de licuefacción en caso de sismo. La resistencia a alcanzar (protección contra la licuefacción) es del orden de entre 0,2 MPa y 0,25 MPa. Se entiende por « licuefacción de las arenas » cualquier proceso que conduce a la pérdida total de resistencia al cizallamiento del suelo por un aumento de la presión intersticial (según la norma NF P 06-013).

15

Los perforaciones se han separado con una malla de 3 m x 3 m, dividiendo la zona en 4 bloques A, B, C, D, de 6 m x 3 m cada una; la figura 5 representa una vista en sección de uno de estos bloques.

20

La zona de arena suelta licuefactable se ha detectado mediante un « Cone Penetration Test » (CPT). El riesgo de licuefacción es bajo en la zona fuera del estrato, por lo tanto hemos tratado la parte de arena licuefactable saturada, desde 3,50 m hasta 9,5 m, es decir, de 6 m de espesor. El volumen de suelo que se va a tratar por bloque es por lo tanto: $3 \times 6 \times 6 = 108 \text{ m}^3$, lo que se corresponde con un volumen de poros (VP) de aproximadamente 44 m^3 para una porosidad del 40 % (VP = $108 \times 0,4$).

25

Los cálculos hidráulicos clásicos, ayudados por un programa informático adaptado, permiten la optimización de la red de perforaciones (de inyección, de bombeo y de lavado), así como de los parámetros de tratamiento, tales como los caudales de inyección y de bombeo, el tiempo de lote, etc.

30

Las diferentes etapas del procedimiento están representadas esquemáticamente en la figura 4 y de forma más detallada en las figuras 6 y 7; en estas últimas, se utilizan los siguientes símbolos:

○ Pozos de inyección de la biomasa y de las soluciones calcificantes, y pozos de extracción de las soluciones calcificantes durante el lavado

35

⊗ Pozos de extracción durante las inyecciones

⊘ Pozos de lavado enrejillados en la capa tratada

40

Preparación de las soluciones

En función de las limitaciones de la puesta en práctica en el sitio, se fija una velocidad de hidrólisis de 5,8 mmol de urea/l/min para obtener una AE_{tot} de 600 μ S/min.

45

Para conseguir estos valores es necesaria la utilización de una concentración de bacterias liofilizadas de 0,78 g/l.

Bloque A - Inyección de las soluciones - figura 6

Las soluciones se inyectan según el siguiente protocolo. El caudal de inyección es de $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

50

T_0 a $T_0 + 7,5 \text{ h}$ = T_1 Inyección de 1 VP ($6 \times 3 \times 6 \times 0,4$) = 44 m^3 de bacterias

T_1 a $T_1 + 7 \text{ h}$ = T_2 Tiempo de lote

T_2 a $T_2 + 7,5 \text{ h}$ = T_3 Inyección de la solución calcificante nº 1 (1 VP)

55

T_3 a $T_3 + 24 \text{ h}$ = T_4 Tiempo de lote

T_4 a $T_4 + 7,5 \text{ h}$ = T_5 Inyección de la solución calcificante nº 2 (1 VP)

T_5 a $T_5 + 35 \text{ h}$ = T_6 Tiempo de lote

En un primer momento se inyecta la solución de bacterias calcificantes, que va a desplazar el agua contenida en el suelo; se deja que las bacterias se fijen al suelo (tiempo de lote). Después se inyecta la solución calcificante nº 1, que va a desplazar a la solución de bacterias; se recoge un residuo de biomasa. Se deja producir la calcificación (tiempo de lote), después se inyecta una segunda solución calcificante, que va a desplazar a la primera solución calcificante (esta etapa es opcional, se podrá omitir si se alcanza la resistencia mecánica buscada); se recoge un residuo de la primera solución calcificante, y se deja finalizar la calcificación (tiempo de lote).

60

65

Bloque A - Lavado - figura 6

El lavado se lleva a cabo con un caudal de 3,5 m³/h.

- 5 Se llevan a cabo todos los lavados necesarios para la obtención de un agua de lavado cuya concentración de iones NH₄⁺ es inferior a 100 mg/l.

Bloques B-C-D - figura 1

- 10 Los bloques B, C y D se tratan de la misma forma que el bloque A.

Resultados

- 15 La tabla 3 recoge las diferentes etapas del procedimiento según la invención, aplicado al bloque A, e incluye la concentración de iones NH₄⁺ medida desde que se produce la calcificación del suelo. Se han extrapolado los valores medidos para el bloque A a los bloques B, C y D; los resultados se presentan en las tablas 4 hasta 6.

- 20 Como se puede constatar a partir de la lectura de la tabla 3, el agua del suelo desplazada por la inyección de la biomasa se utiliza para la preparación de la primera solución calcificante, y el agua de la biomasa desplazada por la inyección de la primera solución calcificante se utiliza para la preparación de la segunda solución calcificante.

- 25 El suelo consolidado del bloque A se lava siete veces mediante la utilización del agua de la red de alimentación. Las aguas recogidas son recicladas para el tratamiento del bloque B (aguas de lavado A5 - A10) y del bloque D (aguas de lavado A3 - A4).

- Las aguas de lavado del bloque B son recicladas para el tratamiento del bloque C (aguas B5 - B10) y del bloque D (aguas B3 - B4).

- 30 Las aguas del lavado del bloque C son recicladas para el tratamiento del bloque D (aguas C5 - C9).

Tabla 3

	Agua utilizada	Producto inyectado	Producto extraído	[NH ₄ ⁺] (g/l)	VP (m ³)	Destino del producto extraído		REF.
	Bloque A	red	Biomasa	Agua del terreno	-	44	reciclaje	sol cal 1 A
A 1		Sol Cal 1 A	Agua de la biomasa	-	44	reciclaje	sol cal 2 A	A 2
A 2		Sol Cal 2 A	NH ₄ Cl	35,51	44	evaporación	flush 6 D	A 3
red		Flush 1	NH ₄ Cl	41,79	44	evaporación	flush 7 D	A 4
red		Flush 2	NH ₄ Cl	16,46	44	reciclaje	biomasa B	A 5
red		Flush 3	NH ₄ Cl	4,82	44	reciclaje	biomasa B / sol cal 1 B	A 6
red		Flush 4	NH ₄ Cl	1,53	44	reciclaje	sol cal 1 B + 2 B	A 7
red		Flush 5	NH ₄ Cl	0,53	44	reciclaje	flush 1 B	A 8
red		Flush 6	NH ₄ Cl	0,21	44	reciclaje	flush 2 B	A 9
red		Flush 7	NH ₄ Cl	0,09	44	reciclaje	flush 3 B	A 10

Tabla 4

	Agua utilizada	Producto inyectado	Producto extraído	[NH ₄ ⁺] (g/l)	VP (m ³)	Destino del producto extraído		REF.
	Bloque B	A 5	Biomasa	Agua del terreno	-	44	reciclaje	sol cal 1 B
A 6		Sol Cal 1 B	Agua de la biomasa	-	44	reciclaje	sol cal 2 B	B 2
A 7		Sol Cal 2 B	NH ₄ Cl	35,51	44	evaporación	flush 3 D	B 3
A 8		Flush 1	NH ₄ Cl	41,79	44	evaporación	flush 4 D	B 4
A 9		Flush 2	NH ₄ Cl	16,46	44	reciclaje	biomasa C	B 5
A 10		Flush 3	NH ₄ Cl	4,82	44	reciclaje	biomasa C / sol cal 1 C	B 6
red		Flush 4	NH ₄ Cl	1,53	44	reciclaje	sol cal 1 C + 2 C	B 7

ES 2 559 300 T3

Bloque B	Agua utilizada	Producto inyectado	Producto extraído	[NH ₄ ⁺] (g/l)	VP (m ³)	Destino del producto extraído		REF.
	red	Flush 5	NH ₄ Cl	0,53	44	reciclaje	flush 1 C	B 8
	red	Flush 6	NH ₄ Cl	0,21	44	reciclaje	flush 2 C	B 9
	red	Flush 7	NH ₄ Cl	0,09	44	reciclaje	flush 3 C	B 10

Tabla 5

Bloque C	Agua utilizada	Producto inyectado	Producto extraído	[NH ₄ ⁺] (g/l)	VP (m ³)	Destino del producto extraído		REF.
	B 5	Biomasa	Agua del terreno	-	44	reciclaje	sol cal 1 c	C 1
	B 6	Sol Cal 1	Agua de la biomasa	-	44	reciclaje	sol cal 2 c	C 2
	B 7	Sol Cal 2	NH ₄ Cl	35,51	44	evaporación	agua limpia	C 3
	B 8	Flush 1	NH ₄ Cl	41,79	44	evaporación	agua limpia	C 4
	B 9	Flush 2	NH ₄ Cl	16,46	44	reciclaje	biomasa D	C 5
	B 10	Flush 3	NH ₄ Cl	4,82	44	reciclaje	biomasa D / sol cal 1 D	C 6
	red	Flush 4	NH ₄ Cl	1,53	44	reciclaje	sol cal 1 + 2 D	C 7
	red	Flush 5	NH ₄ Cl	0,53	44	reciclaje	flush 1 D	C 8
	red	Flush 6	NH ₄ Cl	0,21	44	reciclaje	flush 2 D	C 9
red	Flush 7	NH ₄ Cl	0,09	44	reciclaje	flush 5 D	C 10	

Tabla 6

Bloque D		Producto inyectado	Producto extraído	[NH ₄ ⁺] (g/l)	VP (m ³)	Destino del producto extraído	
	C 5	Biomasa	Agua del terreno	-	44	evacuación	medio natural
	C 6	Sol Cal 1 D	biomasa	-	44	evacuación	medio natural
	C 7	Sol Cal 2 D	NH ₄ Cl	35,51	44	evaporación	medio natural
	C 8	Flush 1	NH ₄ Cl	41,79	44	evaporación	medio natural
	C 9	Flush 2	NH ₄ Cl	16,46	44	evaporación	medio natural
	B 3	Flush 3	NH ₄ Cl	4,82	44	evaporación	medio natural
	B 4	Flush 4	NH ₄ Cl	1,53	44	evacuación	medio natural
	C 10	Flush 5	NH ₄ Cl	0,53	44	evacuación	
	A 3	Flush 6	NH ₄ Cl	0,21	44	evacuación	medio natural
A 4	Flush 7	NH ₄ Cl	0,09	44	evacuación	medio natural	

5 En la Tabla 7 se proporciona un resumen de los diferentes productos inyectados para el tratamiento de los bloques A hasta D.

Tabla 7

Origen		Volúmenes en m ³	% total	% de la parte reciclada
Red ¹	16 * 44	704	40 %	
Sol Cal ²	8 * 44	352	20 %	33,33 %
Biomasa ³	3 * 44	132	7,5 %	12,5 %
Flush ⁴	13 * 44	572	32,5 %	54,17 %
total		1.760	100 %	
Reciclada (2 + 3 + 4)		1.056	60 %	

ES 2 559 300 T3

Origen		Volúmenes en m ³	% total	% de la parte reciclada
1 : agua de red utilizada para el tratamiento de los bloques A, B y C				
2 : soluciones calcificantes, preparadas a partir de agua reciclada, utilizadas para el tratamiento de los bloques A, B, C y D				
3 : biomasa, preparada a partir de agua reciclada, utilizada para el tratamiento de los bloques B, C y D				
4 : agua de lavado reciclada, utilizada para el tratamiento de los bloques B, C y D				

Se constata que, en el procedimiento según la invención, el 60 % del agua utilizada bien para la preparación de la biomasa, bien para la preparación de las soluciones calcificantes, bien para el lavado del suelo consolidado, es agua reciclada. Esto resulta ser particularmente ventajoso en los sitios en los que el aprovisionamiento de agua es difícil.

5 Esto facilita igualmente la gestión en el sitio (almacenamiento, transporte, tratamiento).

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de consolidación de suelos *in situ* que comprende las siguientes etapas:
- 5 a) la inyección de una solución de bacterias calcificantes, preparada a partir de bacterias en polvo, en el volumen de suelo que se va a tratar;
b) la inyección de una solución calcificante;
c) el lavado con agua del volumen de suelo tratado;
d) la medición de la concentración de iones amonio en el agua de lavado y en el suelo tratado;
10 e) el reciclaje del agua de lavado en el procedimiento.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además el control de la evolución de la calcificación de las bacterias, y si fuera necesario, la repetición de la etapa b) con una solución calcificante idéntica o diferente.
- 15 3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la etapa b) se repite mediante la utilización de la misma solución calcificante.
4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la concentración de iones amonio del agua de lavado resultante de la etapa c) es superior o igual a 20 g/l, comprendiendo la etapa e):
20 e1) el tratamiento del agua de lavado para la obtención de un agua cuya concentración de iones amonio es inferior a 1 g/l;
e2) el encaminamiento del agua así obtenida hacia una unidad de almacenamiento de agua.
- 25 5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la concentración de iones amonio del agua de lavado resultante de la etapa c) es inferior a 20 g/l, comprendiendo la etapa e):
e3) el encaminamiento del agua así obtenida hacia una unidad de almacenamiento de agua.
- 30 6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la etapa c) se repite hasta la obtención de una concentración de iones amonio en el agua de lavado inferior a 100 mg/l.
7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la dosis de bacterias en polvo se determina en función de la productividad buscada.
35
8. Procedimiento de consolidación *in situ* de varias parcelas de suelo que comprende la puesta en práctica del procedimiento definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 para cada una de dichas parcelas.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que las aguas de lavado de una de las parcelas, cuya concentración de iones amonio está comprendida en el intervalo de entre 5 y 50 g/l, preferiblemente en el intervalo de entre 20 g/l y 30 g/l, se utilizan para la preparación de la solución de bacterias calcificantes necesarias para el tratamiento de una o de otras varias parcelas.
40
10. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que las aguas de lavado de una de las parcelas, cuya concentración de iones amonio está comprendida en el intervalo de entre 1 g/l y < 20 g/l, se utilizan para la preparación de la solución de bacterias calcificantes y/o de la(s) solución(es) calcificante(s) necesaria(s) para el tratamiento de una o de otras varias parcelas.
45
11. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que las aguas de lavado de una de las parcelas, cuya concentración de iones amonio es inferior a 1 g/l, se utilizan para el lavado de una o de otras varias parcelas.
50

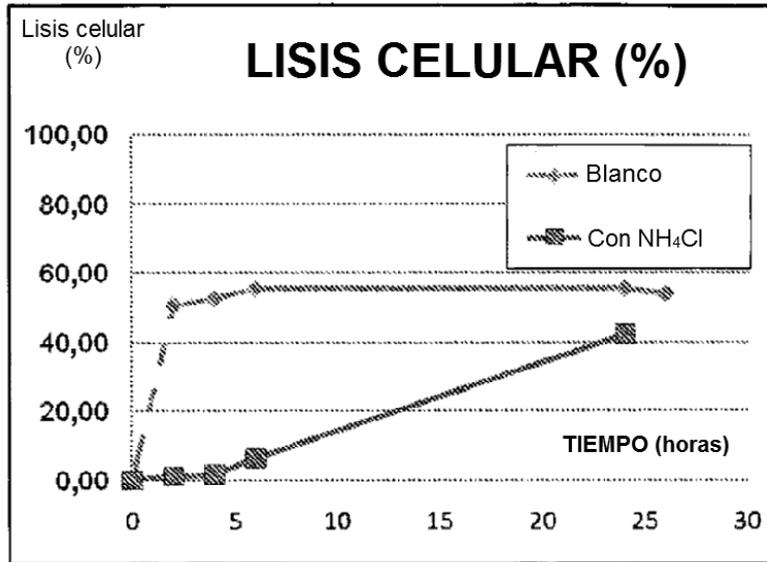


FIG.1

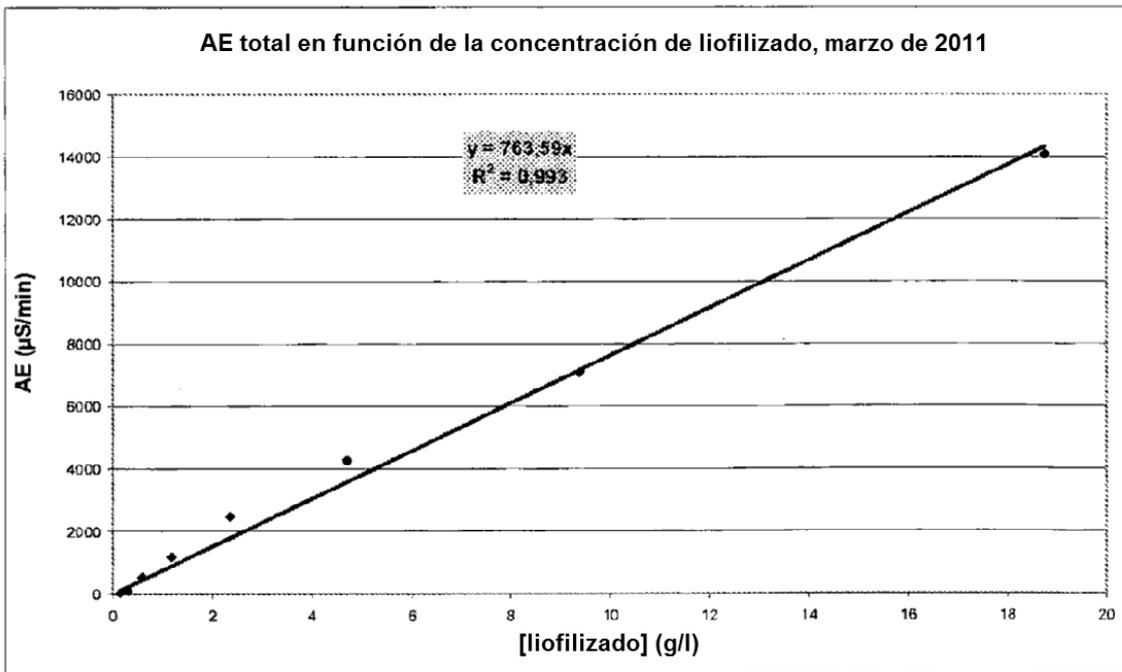


FIG.2

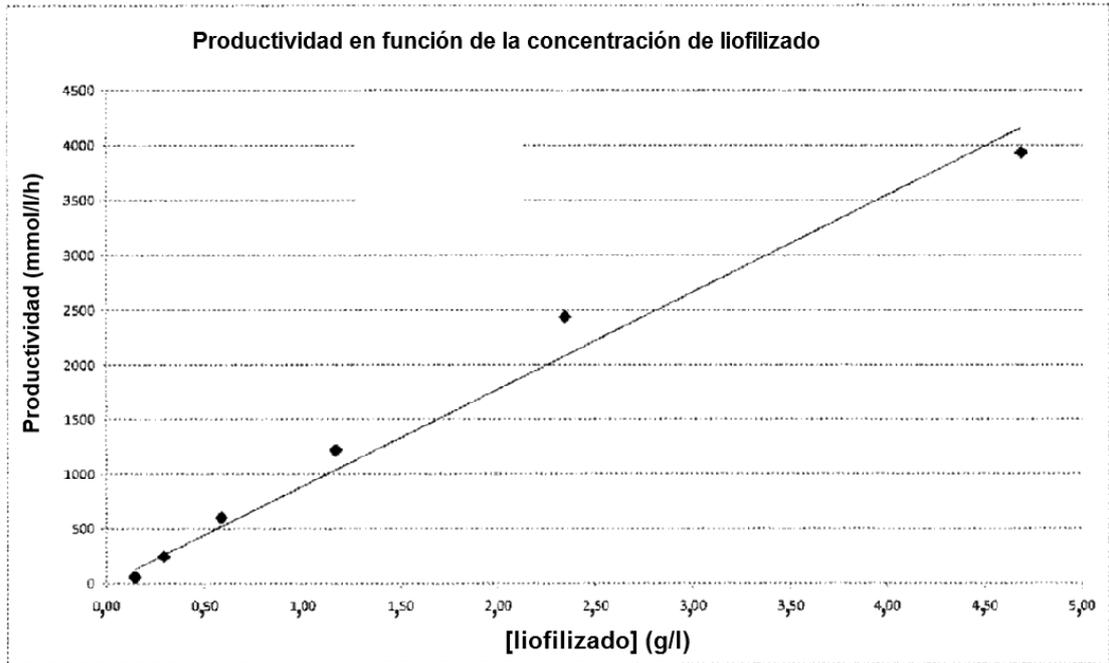


FIG.3A

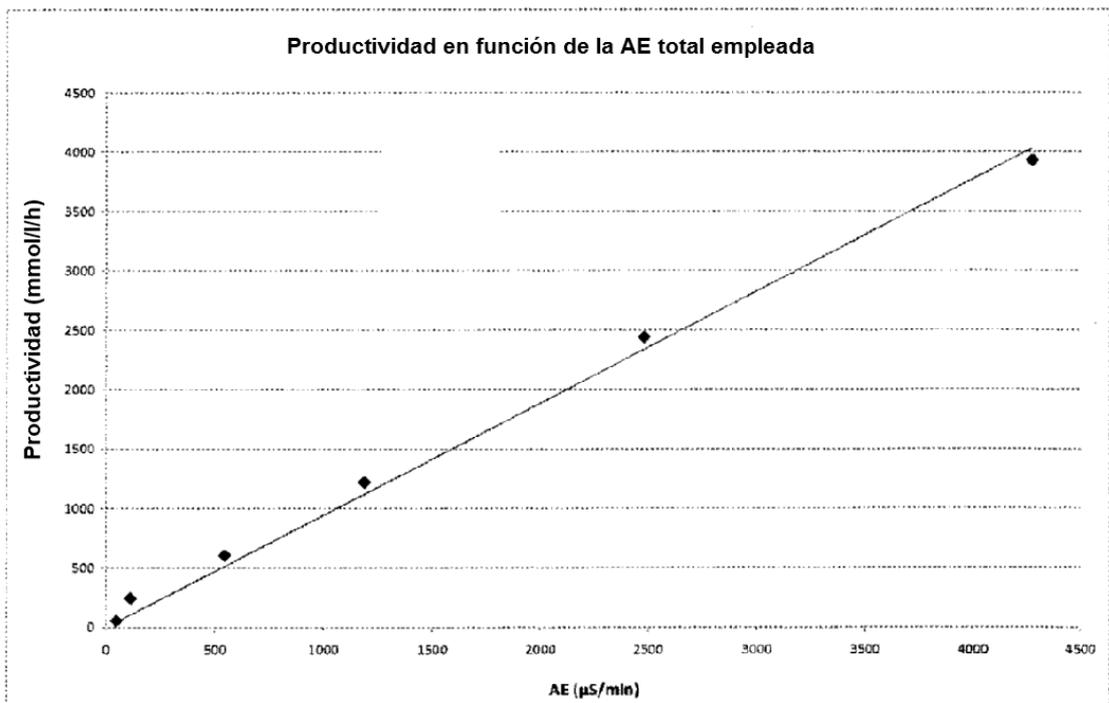


FIG.3B

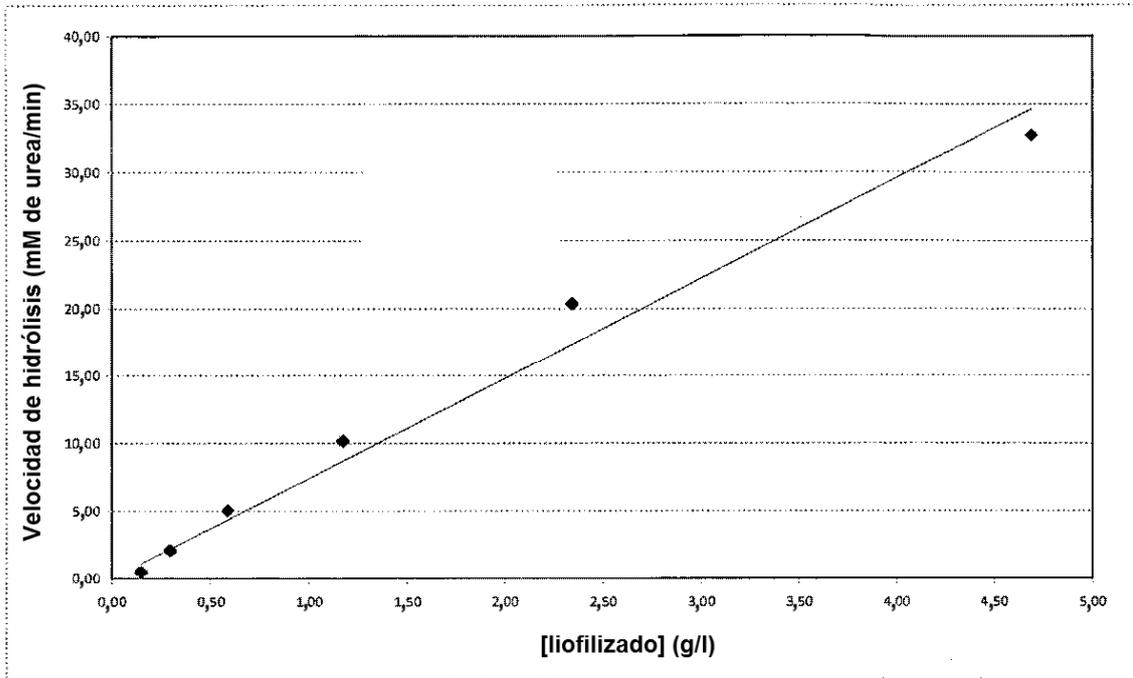


FIG.3C

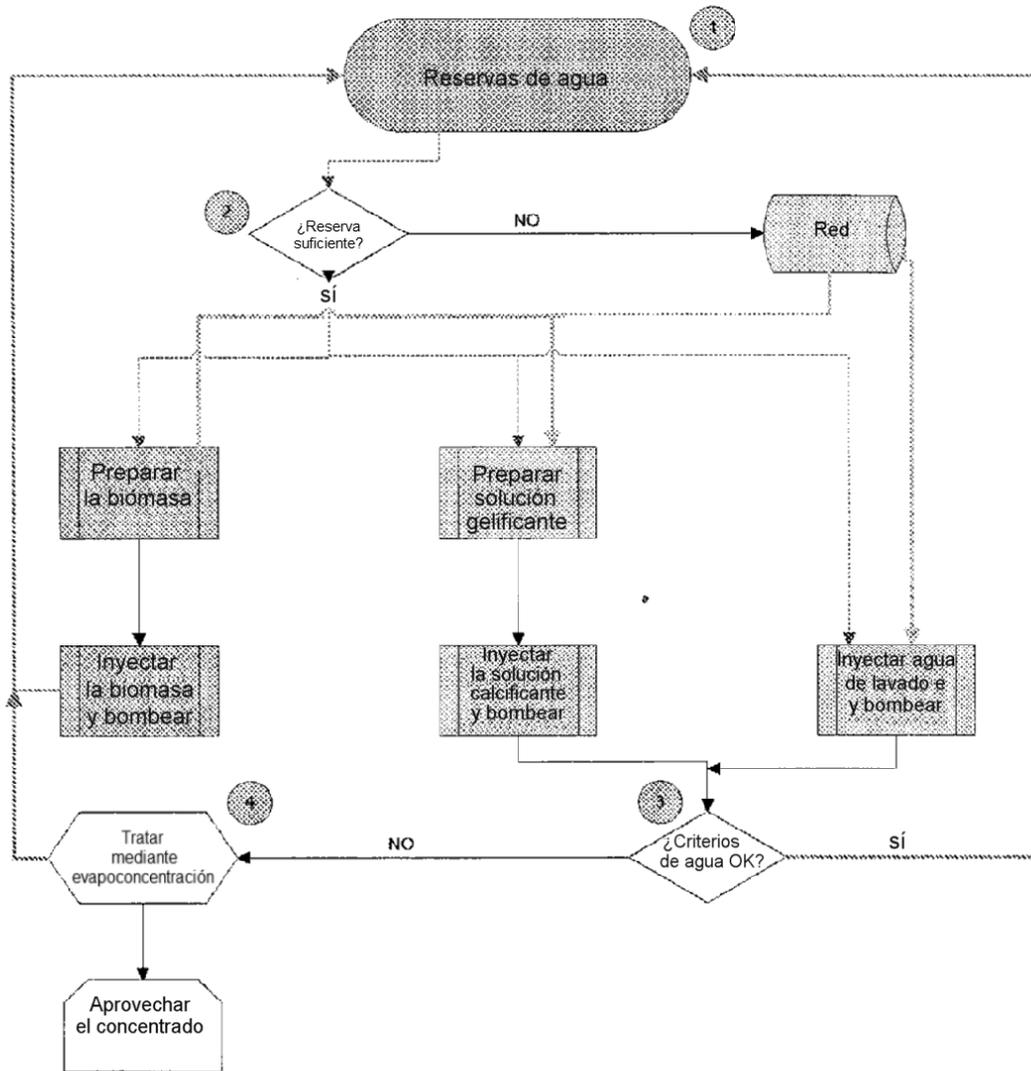


FIG.4

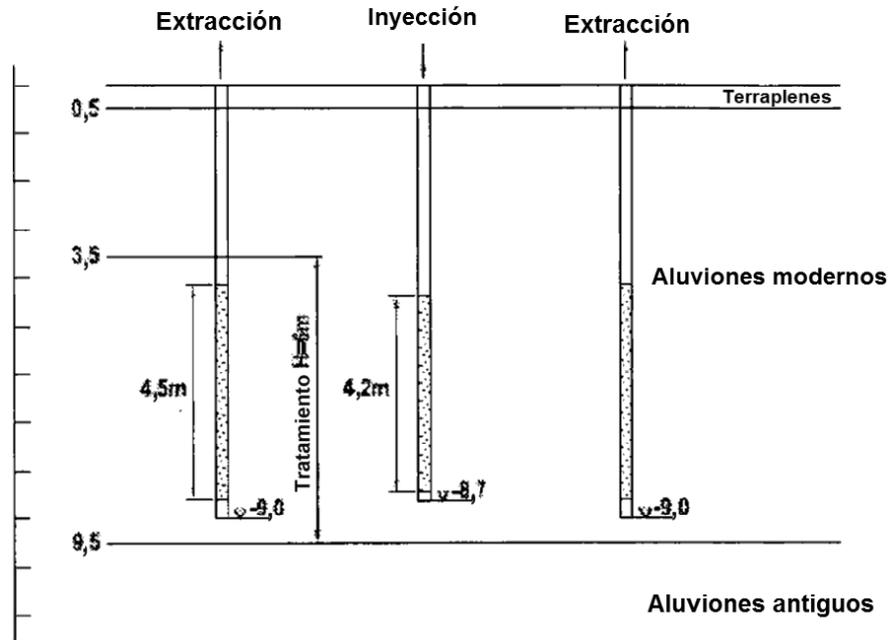


FIG.5

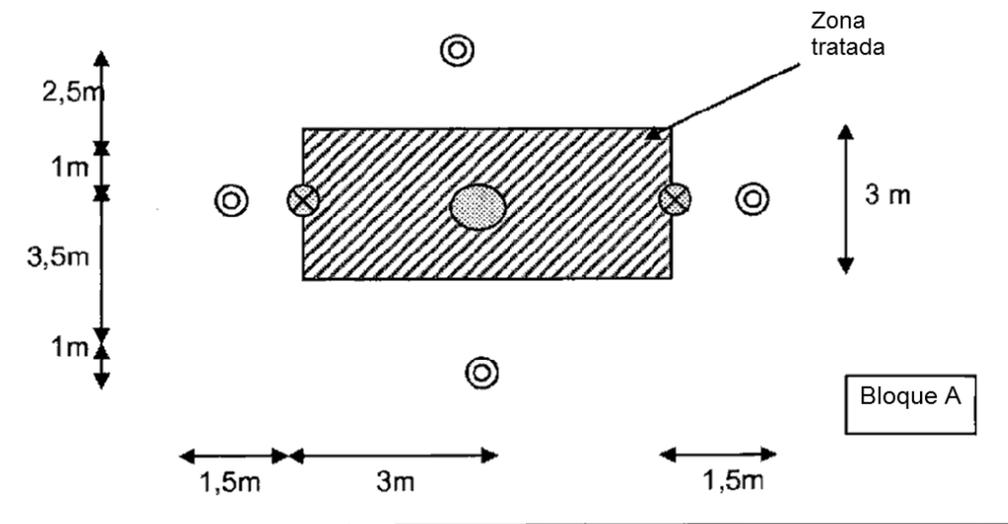


FIG.6

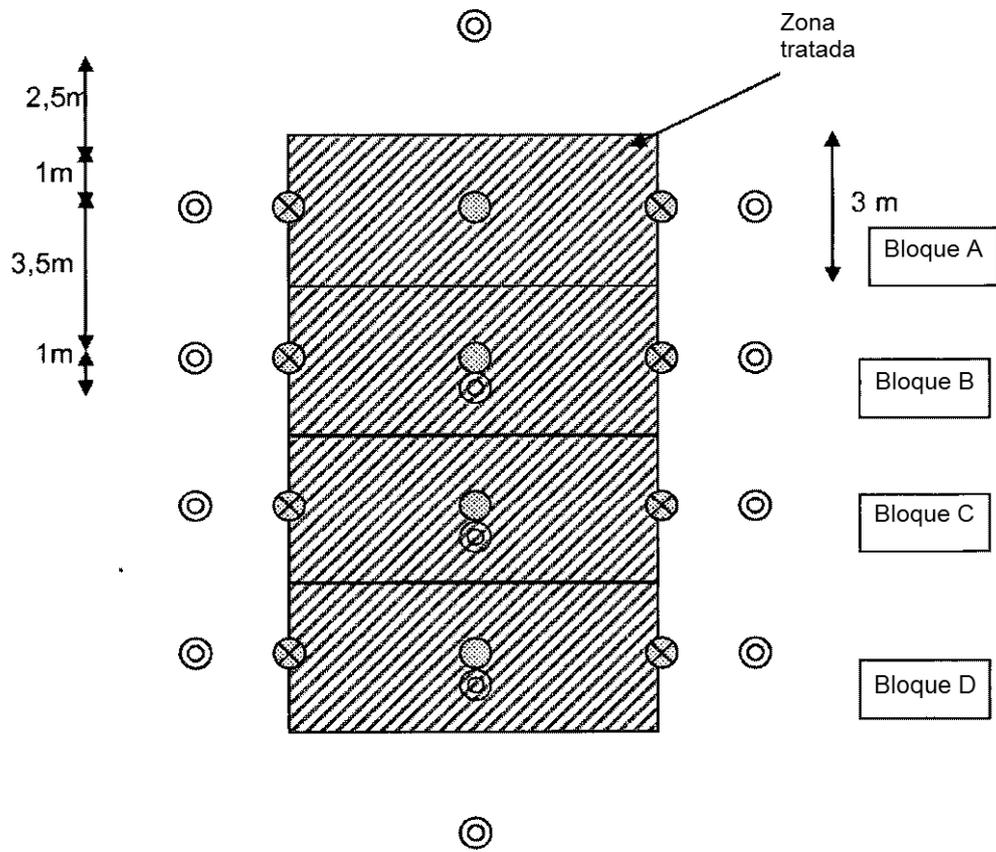


FIG.7