

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
Oficina internacional

(43) Fecha de publicación internacional
18 de abril de 2024 (18.04.2024)



(10) Número de publicación internacional
WO 2024/079373 A1

- (51) Clasificación internacional de patentes:
C02F 1/26 (2023.01) B09C 1/02 (2006.01)
- (21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2023/070598
- (22) Fecha de presentación internacional:
09 de octubre de 2023 (09.10.2023)
- (25) Idioma de presentación: español
- (26) Idioma de publicación: español
- (30) Datos relativos a la prioridad:
P202230876 11 de octubre de 2022 (11.10.2022) ES
- (71) Solicitante: **UNIVERSITAT DE BARCELONA** [ES/ES]; Centre de Patents de la UB, Baldiri Reixac 4 - Torre D, 08028 Barcelona (ES).
- (72) Inventores: **CARMONA PÉREZ, José María**; UNIVERSITAT DE BARCELONA, Facultat de Ciències de la Terra - Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona (ES). **PUI-**

GSERVER CUERDA, Diana; UNIVERSITAT DE BARCELONA, Facultat de Ciències de la Terra - Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona (ES). **HERRERO FERRAN, Jofre**; UNIVERSITAT DE BARCELONA, Facultat de Ciències de la Terra - Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona (ES).

(74) Mandatario: **BERTRÁN VALLS, Silvia**; Paseo de la Castellana, 140. Planta 3ª, Edificio Lima, 28046 Madrid (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,

(54) Title: RECIRCULATION CELL FOR GROUNDWATER REMEDIATION IN AQUIFER-AQUITARD TRANSITION ZONES

(54) Título: CELDA DE RECIRCULACIÓN PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS DE TRANSICIÓN ACUÍFERO-ACUITARDO

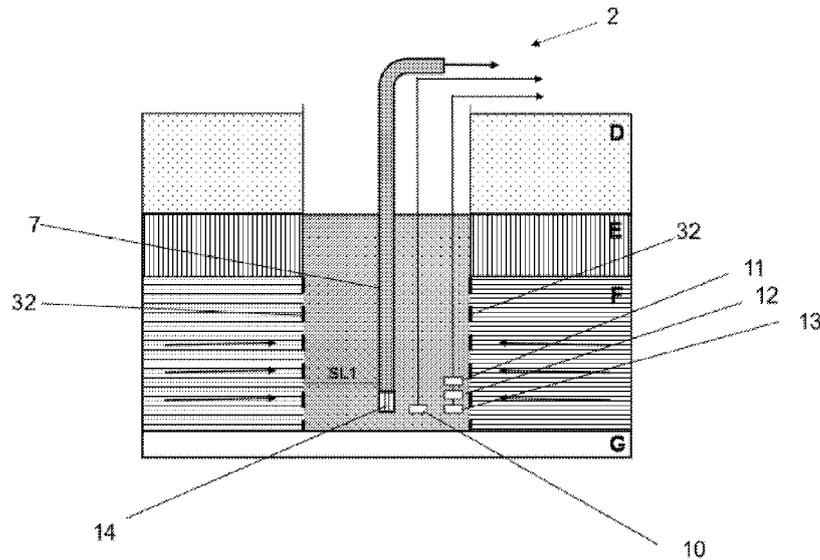


FIG. 2

(57) Abstract: The invention relates to recirculation cells and decontamination methods, characterised in that they operate at low volumes and involve half cycles of filling and emptying that allow the effective treatment of pollution present in aquifer-aquitard transition zones.

(57) Resumen: Se da a conocer celdas de recirculación y procedimientos de descontaminación caracterizados por operar a bajos caudales y por semiciclos de llenado y vaciado que permiten el tratamiento efectivo de la contaminación presente en zonas de transición acuífero-acuitardo.

[Continúa en la página siguiente]



WO 2024/079373 A1

SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados *(a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible)*: ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

— con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))

Celda de recirculación para la remediación de agua subterránea en zonas de transición acuífero-acuitardo

La presente invención se refiere al campo de la descontaminación de aguas subterráneas, más concretamente a una celda de inyección-extracción que permite descontaminar de forma efectiva las zonas de transición acuífero-acuitardo.

ESTADO DE LA TÉCNICA

A escala mundial, las aguas subterráneas proporcionan entre el 25 y el 40% del agua de bebida (UNEP, (2003). *Groundwater and its Susceptibility to Degradation*. UNEP/DEWA, Nairobi). En Europa el 60% del agua potable es de origen subterráneo (Schmidt-Thomé, P., & Klein, J. (Eds.). (2013). *Climate change adaptation in practice: from strategy development to implementation*. John Wiley & Sons.). La pérdida de su calidad tiene consecuencias sanitarias y económicas, pues incrementa los costes de potabilización. Por ello, la lucha contra su contaminación es uno de los grandes retos de la sociedad actual, pues pone en riesgo la salud humana y los ecosistemas (Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., & Srinivasamoorthy, K. (2021). *Sources and consequences of groundwater contamination*).

La descontaminación de las aguas subterráneas tradicionalmente se ha llevado a cabo tanto a nivel de técnicas *ex-situ* (a menudo mediante sistemas de tipo bombeo y tratamiento, en inglés, *pumping and treat*) o mediante técnicas *in-situ*.

Entre las técnicas *in-situ* de uso frecuente se encuentran las de remediación química y las de biorremediación (Chen, Q., Fan, G., Na, W., Liu, J., Cui, J., & Li, H. (2019). *Past, present, and future of groundwater remediation research: A scientometric analysis*. International journal of environmental research and public health, 16(20), 3975). Estas técnicas han sido aplicadas casi siempre de forma separada. Entre las técnicas químicas, conocidas en la literatura anglosajona como *in-situ chemical remediation*, se distinguen las que utilizan reactivos que llevan a cabo reacciones de oxidación (en inglés, *In-Situ Chemical Oxidation*, ISCO) (ITRC, I. (2005). *Technical and regulatory guidance for in situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater*, New York: Council TITaR.) y las que emplean reactivos que dan lugar a reacciones de reducción (en inglés, *In-Situ Chemical Reduction*, ISCR), (Tratnyek, P. G., Johnson, R. L., Lowry, G. V., & Brown, R. A. (2014). *In situ chemical reduction for source*

remediation. In *Chlorinated Solvent Source Zone Remediation* (pp. 307-351). Springer, New York, NY).

5 En el caso de las técnicas ISCO, una de las principales limitaciones que se conocen es la corta vida media de los reactivos utilizados (con la excepción del uso de permanganato potásico). Esto limita mucho la migración de los reactivos aguas abajo de su punto de inyección (Siegrist, R. L., Crimi, M., & Simpkin, T. J. (Eds.). (2011). *In situ chemical oxidation for groundwater remediation* (Vol. 3). Springer Science & Business Media) y limita también la zona de tratamiento, y consecuentemente la eficiencia en la descontaminación. Además, la

10 corta vida de los reactivos dificulta la penetración de éstos, por difusión molecular, hasta el interior de los niveles de baja conductividad hidráulica, en donde se almacenan grandes cantidades de contaminante (EPA (2017): *How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites A Guide For Corrective Action Plan Reviewers*. EPA 510-B-17-003). La falta de tratamiento de estos niveles favorece la existencia del denominado

15 efecto rebote una vez descontaminado el acuífero (Puigserver, D. Herrero, J., Nogueras, X., Cortés, A., Parker, B. L. Playà, E. & Carmona, J. M. (2021). *Biotic and abiotic reductive dechlorination of chloroethenes in aquitards*. Science of the total environment), con lo que éste vuelve a contaminarse.

20 En el caso de los reactivos utilizados en las técnicas ISCR, uno de los más habituales ha sido el hierro metálico (Fe^0), conocido como *Zero Valent Iron* (ZVI). Se trata de un reactivo que se aplica al medio en forma de partículas de diferentes tamaños de grano, desde tamaño milimétrico (mm) a tamaño de micropartículas (μm) y nanopartículas (nm) (Labeeuw, V. (2013). *In Situ Chemical Reduction using Zero-Valent Iron Injection—A Technique for the*

25 *Remediation of Source Zones*. CiyChlor. Machteld De Wit, OVAM, 104). Estas partículas se inyectan en el medio en forma de dispersión dentro de una emulsión que las mantiene en suspensión. En función de su tamaño, las partículas de ZVI presentan diferentes limitaciones, siendo la más importante el peso individual de esas partículas.

30 Entre las técnicas de biorremediación, se diferencian dos grandes grupos. Las basadas en la bioestimulación de la población microbiana indígena y las basadas en la bioaugmentación mediante la inoculación de microorganismos alóctonos, pero capaces de degradar los contaminantes del medio, y la inoculación de los microorganismos autóctonos cultivados en laboratorio (Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). *Bioremediation*,

biostimulation and bioaugmentation: a review. International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 3(1), 28-39).

Los reactivos utilizados en la bioestimulación son muy variados, y van desde los nutrientes a los donadores de electrones, entre otros (Hussain, C. M. (Ed.). (2020). *The handbook of environmental remediation: classic and modern techniques*. Royal Society of Chemistry). En todos los casos, sin embargo, uno de los problemas que a menudo se presenta con la bioestimulación es que existe la posibilidad de promocionar el sobrecrecimiento microbiano de comunidades que no descontaminan los compuestos que se desea eliminar (Puigserver, D., Carmona, J. M., Barker, J., Cortes, A., Nogueras, X., & Viladevall, M. (2011). *Use of chemical and biological techniques in the remediation of sites contaminated by chlorinated solvents*. Journal of IAHS-AISH. International Association of Hydrological Sciences, 445-448.), o que se generan desplazamientos del nicho microbiano, lo que disminuye la eficiencia en la descontaminación (Herrero, J., Puigserver, D., Nijenhuis, I., Kuntze, K., & Carmona, J. M. (2019). *Combined use of ISCR and biostimulation techniques in incomplete processes of reductive dehalogenation of chlorinated solvents*. Science of the total environment, 648, 819-829.).

Además, en la mayoría de los casos la inyección de reactivos y de tratamientos de la contaminación se centran en descontaminar los acuíferos. Sin embargo, las técnicas utilizadas tienen una muy baja penetrabilidad dentro de las formaciones de baja conductividad hidráulica (zonas de transición acuífero-acuitardo), lo que dificulta el tratamiento de esas zonas, dentro de las cuales se almacenan grandes cantidades de contaminante, especialmente cuando se trata de episodios de contaminación maduros (es decir, con décadas de edad desde que se inició la contaminación).

Los procedimientos habitualmente utilizados para emplazar los tratamientos y/o reactivos en el medio contaminado se han basado en métodos pasivos o mediante la creación de celdas cerradas de inyección y bombeo en el acuífero. Estos tratamientos consisten en soluciones acuosas de productos químicos (por ejemplo, reactivos químicos) o emulsiones de preparados específicos (por ejemplo, de microorganismos cultivados para su inoculación en el medio. De ahora en adelante, las citadas soluciones acuosas y emulsiones serán referidas en este documento como “tratamiento” o “tratamientos”, independientemente de que se trate de tratamientos químicos o biológicos.

En Kitanidis & McCarty (2012) se tratan los métodos pasivos y las celdas cerradas de inyección y bombeo (Kitanidis, P. K. & McCarty, P. L. (Eds.). (2012). *Delivery and Mixing in the Subsurface: Processes and Design Principles for in situ remediation* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.).

5

Los métodos pasivos consisten en la inyección de los reactivos en el acuífero dejando que éstos reaccionen a lo largo del flujo (Rosansky, S., Condit, W., & Sirabian, R. (2013). *Best practices for injection and distribution of amendments*. Technical Report TR-NAVFAC-EXWC-EV-1303.). Ello implica que la mayor parte de los reactivos migren a través de los niveles más permeables, es decir, niveles más conductores (o sea, de mayor conductividad hidráulica) dejando de interactuar con los niveles de baja conductividad hidráulica, en donde se acumulan grandes cantidades de contaminantes.

10

En el caso de la utilización de celdas cerradas (formadas por pozos de inyección de agua con tratamiento y/o reactivos y pozos de extracción de agua tratada dentro del medio contaminado), la continua inyección y el bombeo modifican el campo de flujo natural y el caudal que fluye entre los pozos de inyección y de extracción. Esto requiere de medios suficientemente permeables que eviten que el sistema quede seco y lo aíslen del resto del acuífero (Muller, K. A., Johnson, C. D., Bagwell, C. E., & Freedman, V. L. (2019). *Review of Amendment Delivery and Distribution Methods, and Relevance to Potential In Situ Source Area Treatment at the Hanford Site* (No. PNNL-29198; DVZ-RPT-0023-Rev. 0.0). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States)). Adicionalmente, en el caso de que los reactivos favorezcan la generación de condiciones redox reductoras, éstas se ven promovidas en la zona de influencia de la celda. El problema surge cuando los productos de degradación generados son más tóxicos que los parentales de los que derivan, lo que incrementa el riesgo para la salud humana y los ecosistemas, especialmente cuando éstos se acumulan en el medio.

20

25

Existen dos grandes grupos de sistemas de inyección de reactivos en el medio. Por un lado, se tienen los sistemas basados en la realización de perforaciones que quedan equipadas como pozos de inyección que permiten la inyección continua o discontinua de los reactivos. Por otro lado, las técnicas de tipo *Direct-Push* basadas en la perforación del medio e inyección simultánea de los reactivos, por lo que se trata de inyecciones puntuales (en el espacio y en el tiempo) y guiadas, pero que no permiten la introducción posterior de reactivos en ese mismo punto (Muller, K. A., Johnson, C. D., Bagwell, C. E., & Freedman, V. L. (2019). *Review of*

35

Amendment Delivery and Distribution Methods, and Relevance to Potential In Situ Source Area Treatment at the Hanford Site (No. PNNL-29198; DVZ-RPT-0023-Rev. 0.0). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States)).

5 Aparte de estos dos grupos, también existen sistemas capaces de introducir los reactivos en el medio de forma instantánea (un pulso de inyección), o mediante un sistema pasivo, como es la introducción en un pozo de barras de productos capaces de liberar lentamente reactivo al contacto con el agua subterránea, como es el caso de barras de ORC (iniciales del inglés, *oxygen release compound* – compuesto liberador de oxígeno), que se disuelven liberando
10 oxígeno de forma progresiva a medida que el flujo de agua subterránea circula.

Tal como se deriva de lo anterior, en el estado de la técnica sigue existiendo la necesidad de disponer de sistemas y procedimientos que permitan el tratamiento de la gran cantidad de masa de contaminantes que se halla acumulada en el interior de los materiales de baja
15 permeabilidad (conductividad hidráulica) evitando así, el efecto rebote citado anteriormente. Se trata, por ejemplo, de los niveles de baja permeabilidad (conductividad) que se hallan intercalados en la base, en medio o en el techo de numerosos acuíferos formando las zonas de transición que frecuentemente existen entre los acuíferos y los acuitardos subyacentes o suprayacentes (aunque, en menor medida, también se pueden hallar en medio de los
20 acuíferos). Estas zonas de transición acuífero-acuitardo están formadas por numerosas intercalaciones de niveles de grosor centimétrico y de baja permeabilidad (conductividad hidráulica) en donde se acumulan los contaminantes. Estas intercalaciones están separadas por niveles más permeables (más conductores), también de grosor centimétrico. La alternancia de niveles de baja permeabilidad (por debajo de 0,001 cm/s) y niveles más
25 permeables (entre 0,001 y 0,023 cm/s) hace que estas zonas de transición sean en conjunto (o sea, globalmente) formaciones de baja permeabilidad (es decir, de baja conductividad hidráulica), o sea formaciones poco permeables. Sin embargo, en cualquier caso, forman parte del acuífero. Su rango de conductividad hidráulica global (es decir, de permeabilidad global) puede variar desde 0,001 cm/s hasta 0,012 cm/s.

30 EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN

Los inventores de la presente invención, tras extensos y exhaustivos experimentos, han descubierto una celda de recirculación que funciona por semiciclos de llenado y vaciado y un procedimiento de descontaminación asociado a la misma que permiten, de forma efectiva y
35 sorprendente, solucionar los problemas presentes en el estado de la técnica (mencionados

anteriormente) y, por tanto, descontaminar las zonas de transición acuífero-acuitardo, situadas en la base, en medio o en el techo de los acuíferos.

Por tanto, la celda de recirculación y el procedimiento de la presente invención son aplicables y efectivos para el tratamiento de medios de baja permeabilidad (es decir, medios de baja conductividad hidráulica), por ejemplo y preferentemente, del tipo zonas de transición acuífero-acuitardo (Puigserver, D., et.al. (2016). *Reductive dechlorination in recalcitrant sources of chloroethenes in the transition zone between aquifers and aquitards*. Environmental Science and Pollution Research, 23(18), 18724-18741; Puigserver, D., et.al. (2020). *Natural attenuation of pools and plumes of carbon tetrachloride and chloroform in the transition zone to bottom aquitards and the microorganisms involved in their degradation*. Science of The Total Environment, 712, 135679), que, aunque frecuentes, el estado de la técnica no logra tratar de forma efectiva y provocan problemas como el efecto rebote y consiguiente recontaminación de acuíferos ya tratados. En contraposición, la celda y procedimiento de la presente invención no son, por tanto, de aplicación para medios de muy baja permeabilidad (como por ejemplo los acuicludos), ni tampoco para acuitardos de elevado grosor, más allá de la escala decimétrica. La celda y el procedimiento de la presente invención tampoco son de aplicación para medios de mediana a alta transmisividad (es decir, buenos medios acuíferos). La transmisibilidad es un parámetro ampliamente conocido en el estado del arte y por el experto en la materia y que resulta de multiplicar la permeabilidad (es decir, la conductividad hidráulica) por el grosor saturado en agua del medio de interés (que tanto puede ser un acuífero como una parte del mismo, como por ejemplo, una zona de transición acuífero-acuitardo).

Por tanto, en un primer aspecto, la presente invención se refiere a una celda de recirculación que comprende:

- a) al menos un pozo de extracción que permite la extracción de agua de una zona de transición acuífero-acuitardo;
- b) al menos un tanque para almacenar agua recirculada;
- 30c) al menos un pozo de reinyección que permite la reinyección en la zona de transición acuífero-acuitardo de agua proveniente del al menos un tanque para almacenar agua recirculada; y
- d) al menos un medio para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo,

caracterizada porque dicha celda está configurada para funcionar en semiciclos de llenado y vaciado del al menos un tanque para almacenar el agua recirculada, de manera que en el

semiciclo de llenado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada se extrae agua del al menos un pozo de extracción a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min para el llenado del mencionado al menos un tanque para almacenar agua recirculada; y en el semiciclo de vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, el agua de dicho tanque se reinyecta en el al menos un pozo de reinyección a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min.

En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento para la descontaminación de una zona de transición acuífero-acuitardo que comprende la utilización de una celda de la presente invención para llevar a cabo dicha descontaminación.

Tal como se utilizan en el presente documento “nivel de baja conductividad hidráulica” y su plural tienen el significado que comúnmente adquieren en el estado de la técnica, es decir, capas de materiales de baja permeabilidad (conductividad hidráulica o permeabilidad por debajo de 0,001 cm/s). Aunque el grosor de estos niveles puede ser variado, en el contexto de la presente invención se trata de capas de poco grosor.

En el presente documento, “formación poco permeable” y su plural adquieren el significado que comúnmente tienen en el estado de la técnica y son acumulaciones de capas (niveles) que, por lo que se refiere a la permeabilidad, pueden ser homogéneas o heterogéneas (es decir con valores de permeabilidad diversos), pero que en conjunto su permeabilidad es baja (no llegando a la categoría de buen acuífero - formación hidrogeológica muy transmisiva).

Tal y como se utilizan en el presente documento “zona de transición acuífero-acuitardo” y su plural, adquieren el significado que comúnmente tienen en el estado de la técnica, es decir, son formaciones constituidas por la alternancia de niveles de baja permeabilidad y niveles más permeables, lo que hace que estas zonas de transición sean en conjunto formaciones poco permeables en las que a lo largo de los niveles más permeables tiene lugar flujo de agua subterránea, es decir, a lo largo de estos niveles más permeables, el agua subterránea fluye “por advección” (se desplaza por advección a poca velocidad, tal y como corresponde al agua subterránea, aunque de manera perceptible a la escala humana); en contraposición, a lo largo de los niveles de baja permeabilidad de la misma zona de transición, el agua no se desplaza frecuentemente de manera perceptible a la escala humana, en cuyo caso nos encontramos ante acuicludos (la advección en estos niveles es prácticamente cero, o sea la velocidad de movimiento del agua es prácticamente cero), aunque, como se ha indicado, los contaminantes penetran en su interior, pero no por flujo advectivo de agua subterránea sino por difusión

molecular. Una zona de transición acuífero-acuitardo, siempre es un acuífero pobre (comparado con un acuífero del mismo grosor, cuya permeabilidad siempre será mayor por el hecho precisamente de ser un acuífero). El problema es que, como se ha explicado anteriormente, cuando la zona de transición está contaminada, el flujo de agua subterránea a través de ella contamina los acuíferos con los que está conectada, de ahí la importancia de lograr medios que permitan la descontaminación de estas zonas, tales como la celda y el procedimiento de la presente invención. El rango de conductividad hidráulica global (permeabilidad global) de una zona de transición acuífero-acuitardo puede variar desde 0,001 cm/s hasta 0,0120 cm/s.

10

En el presente documento, “acuitardo” y su plural adquieren el significado que comúnmente tienen en el estado de la técnica, es decir, es una formación hidrogeológica capaz de almacenar agua, pero cuya conductividad hidráulica es muy baja, por lo que la transmite con lentitud. Ejemplos de acuitardos son las arenas finas y los limos. Un acuitardo presenta una permeabilidad (conductividad hidráulica), cuyo rango varía desde 10^{-7} a 10^{-3} cm/s.

15

Tal y como se utiliza en el presente documento, “acuicludo” y su plural adquieren el significado que comúnmente tienen en el estado de la técnica, es decir, es una formación hidrogeológica que, aunque contiene agua en sus poros, su permeabilidad es extremadamente baja, por lo que el agua circula de manera considerablemente lenta, de forma que a la escala humana se puede considerar como impermeable. En la literatura anglosajona, hay una cierta tendencia a no usar el término acuicludo, sustituyéndolo por el de acuitardo acompañado del valor de su permeabilidad. Ejemplos de acuicludos son las arcillas. Un acuicludo presenta una permeabilidad (conductividad hidráulica) por debajo de 10^{-7} cm/s.

20

Tal y como se utilizan en el presente documento, “medios de mediana a alta transmisividad” y “buenos medios acuíferos” tienen el mismo significado y se usan de forma intercambiable. En ambos casos, el significado es el que comúnmente adquieren en el estado de la técnica. La transmisividad es un parámetro hidráulico que resulta de multiplicar la permeabilidad por el grosor saturado en agua de un acuífero. Este parámetro es indicativo del caudal de agua que circula por el acuífero (y, por tanto, del caudal que se puede extraer de él). Este caudal depende, por tanto, de la permeabilidad del acuífero (cuanto más permeable es, mayor es el caudal que se puede obtener) y del grosor de ese acuífero (cuando mayor es el grosor, mayor es el caudal que se puede obtener). Cuanto más elevado es el valor de este parámetro más bueno es el acuífero y viceversa. Desde el punto de vista de los caudales que se pueden

25

30

35

extraer, la transmisividad es indicativa del caudal de agua que circula por el acuífero (y por tanto del caudal que se puede extraer de él). Los valores de transmisividad ordinarios para buenos acuíferos pueden variar desde 700 (mediana transmisividad) a 4000 m²/día (alta transmisividad).

5

Tal y como se utiliza en el presente documento "conductividad hidráulica" y su plural adquieren el significado que comúnmente tienen en el estado de la técnica. Por tanto, conductividad hidráulica es sinónimo de permeabilidad, y es una medida de la capacidad de un medio para transmitir agua a su través (independientemente del grosor de ese medio). Su determinación en el estado de la técnica es diversa:

10

1. En laboratorio a través de la medida de la permeabilidad (mediante un permeámetro de laboratorio) de una muestra tomada en campo. Representatividad muy puntual.

2. En campo mediante ensayos de campo: ensayos de bombeo, ensayos slug, inyección de trazadores, etc. Representatividad muy elevada de la realidad del medio.

15

3. En gabinete, a través de datos reales de campo (caudal y gradientes hidráulicos). Representatividad muy elevada.

4. Mediante bases de datos de valores reales de rocas y sedimentos en función de su tipología y textura. Representatividad elevada si se realiza una buena testificación de las rocas y sedimentos del subsuelo.

20

En el presente documento la conductividad hidráulica se determina mediante diversos de los métodos de las tipologías 2 y 3 y, como se dispone de las testificaciones de sondeos, comparando con bases de datos de la literatura.

25

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Además, la palabra "comprende" incluye el caso "consiste en". Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los siguientes ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Los signos numéricos relativos a los dibujos y colocados entre paréntesis en una reivindicación, son solamente para intentar aumentar la comprensión de la reivindicación, y no deben ser interpretados como limitantes del alcance de la protección de la reivindicación. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

35

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

FIG. 1. Muestra una vista en planta esquemática de la celda de recirculación de la presente invención colocada en una zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.

5 FIG. 2. Muestra un esquema de un pozo de extracción de la celda de recirculación de la presente invención.

FIG. 3. Muestra un esquema de un pozo de reinyección de la celda de recirculación de la presente invención.

10 FIG. 4. Muestra un esquema de un tanque para almacenar agua recirculada de la celda de recirculación de la presente invención.

FIG. 5. Muestra un esquema de un tanque para almacenar un tratamiento de la celda de recirculación de la presente invención.

FIG. 6. Muestra un esquema del funcionamiento de la celda de recirculación de la presente invención.

15 FIG. 7. Muestra un esquema (sección) de la celda de recirculación de la presente invención utilizada en el ejemplo 1, así como del pretratamiento aplicado en dicho ejemplo a la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.

EXPOSICIÓN DETALLADA DE MODOS DE REALIZACIÓN

20

Tal como se ha indicado anteriormente, en un primer aspecto, la presente invención se refiere a una celda de recirculación que comprende:

a) al menos un pozo de extracción que permite la extracción de agua de una zona de transición acuífero-acuitardo;

25 b) al menos un tanque para almacenar agua recirculada;

c) al menos un pozo de reinyección que permite la reinyección en la zona de transición acuífero-acuitardo de agua proveniente del al menos un tanque para almacenar agua recirculada;

y

30 d) al menos un medio para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo,

caracterizada porque dicha celda está configurada para funcionar en semiciclos de llenado y vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, de manera que en el
35 semiciclo de llenado del al menos un tanque de agua recirculada se extrae agua del al menos

un pozo de extracción a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min para el llenado del mencionado al menos un tanque para almacenar agua recirculada (más preferentemente, a un caudal de entre 0,42 y 1,25 L/min, aún más preferentemente, a un caudal entre 0,58 y 0,94 L/min); y en el semiciclo de vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, el agua de dicho tanque se reinyecta en el al menos un pozo de reinyección a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min (más preferentemente, a un caudal de entre 0,83 y 3,75 L/min, aún más preferentemente a un caudal de 1,25 L/min).

En la celda de la presente invención, el al menos un pozo de extracción y el al menos un pozo de reinyección se posicionan en los extremos de la celda en la dirección y sentido del flujo del agua, situándose el al menos un pozo de extracción aguas abajo y el al menos un pozo de reinyección aguas arriba.

El al menos un pozo de extracción y el al menos un pozo de reinyección presentan preferentemente un revestimiento del pozo.

Cada uno de los pozos de la celda de la presente invención comprende al menos una zona ranurada, más preferentemente una zona ranurada.

La zona ranurada de un pozo (en inglés, *screening zone*, o zona de admisión del pozo, independientemente de que se trate de un pozo de extracción o de inyección) es la parte de un pozo a través de la cual éste extrae o inyecta agua, en función del pozo de que se trate. Es una zona de longitud variable en la que la tubería que forma el correspondiente pozo se halla perforada (ranurada), de manera que el agua entra dentro de la formación geológica porosa y permeable a través de dicha zona ranurada si se trata de un pozo dotado de una bomba de inyección (por tanto, pozo de reinyección). Igualmente, si se trata de un pozo dotado de una bomba de extracción (por tanto, es un pozo de extracción), el agua sale de la formación porosa y permeable a través de la mencionada zona ranurada. La parte superior de la zona ranurada se halla a una determinada profundidad, y la parte inferior de la misma se halla a una profundidad mayor.

En la celda de la presente invención, la zona ranurada del al menos un pozo de extracción y la zona ranurada del al menos un pozo de reinyección se sitúan exactamente frente a la zona de transición acuífero-acuitardo. Es decir, la parte superior de ambas zonas ranuradas se halla a la misma profundidad que la parte superior de la mencionada zona de transición (lo

que se denomina el techo de esa zona de transición), y la parte inferior de ambas zonas ranuradas se halla a la misma profundidad que la parte inferior de la mencionada zona de transición (lo que se denomina la base de esa zona de transición).

- 5 De esta forma el tratamiento y/o los reactivos se inyectan por todo el grosor de la zona de transición contaminada, y el agua recirculada es extraída por todo el grosor de la zona de extracción.

10 La celda de recirculación de la presente invención trabaja por semiciclos. Dos semiciclos forman un ciclo, un semiciclo de llenado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada y un semiciclo de vaciado del al menos un tanque lleno con agua que ha recirculado a lo largo de la zona de influencia de la celda (entre el techo y la base de la zona de transición). Por tanto, en la celda de la presente invención, cuando se extrae el agua a través del al menos un pozo de extracción para llenar el al menos un tanque para almacenar
15 agua recirculada, no se está reinyectando agua en la celda a través del al menos un pozo de reinyección, y viceversa. Es decir, los semiciclos de llenado y vaciado son sucesivos y nunca simultáneos. En una realización preferente el semiciclo de llenado dura entre 60 y 180 minutos; y el semiciclo de vaciado entre 20 y 90 minutos.

20 El caudal de extracción y el de reinyección en la celda de recirculación de la presente invención son muy pequeños. De esta forma, además de evitar una caída desmesurada de niveles y prácticamente el secado de la celda, se obtiene, sobre todo, una velocidad de flujo muy pequeña. Esta baja velocidad asegura que las reacciones químicas y biogeoquímicas que posibilitan la degradación de los contaminantes tengan tiempo suficiente para producirse
25 a lo largo del recorrido realizado por los reactivos o tratamientos dentro de la celda.

Por tanto, en la celda de la presente invención para el tratamiento de zonas de transición acuífero-acuitardo, se extrae agua de dicha zona por el al menos un pozo de extracción hasta el llenado de al menos un taque para almacenar agua recirculada (semiciclo de llenado) y en
30 el posterior semiciclo de vaciado dicha agua recirculada será reinyectada en el al menos un pozo de reinyección y circulara por la celda nuevamente hasta el al menos un pozo de extracción para ser extraída en el siguiente semiciclo de llenado.

En la celda de recirculación de la presente invención, el espacio entre el al menos un pozo de
35 extracción y el al menos un pozo de reinyección determina o comprende la zona a tratar y

descontaminar y es la zona por la que recirculara el agua extraída y reinyectada y el tratamiento o tratamientos inyectados en la celda de la presente invención.

5 En una realización preferente, el al menos un pozo de extracción y el al menos un pozo de reinyección tienen la longitud necesaria para llegar a la zona de transición acuífero-acuitardo y sus respectivas al menos una zona ranurada (preferentemente, una) presenta la disposición anteriormente explicada.

10 Dicho al menos un pozo de extracción, también de forma preferente, tiene la profundidad necesaria para poder extraer agua de la zona de transición acuífero-acuitardo; más preferentemente dicho al menos un pozo de extracción llega hasta la zona de transición acuífero-acuitardo; aún más preferentemente dicho al menos un pozo de extracción llega hasta la base de la zona de transición acuífero-acuitardo.

15 Por su parte, el al menos un pozo de reinyección, en una realización preferente, tiene la profundidad necesaria para poder reinyectar el agua recirculada a la zona de transición acuífero-acuitardo; más preferentemente dicho al menos un pozo de reinyección llega hasta la zona de transición acuífero-acuitardo; aún más preferentemente dicho al menos un pozo de reinyección llega hasta la base de la zona de transición acuífero-acuitardo.

20 Por tanto, un experto en la materia podrá determinar la profundidad necesaria del al menos un pozo de extracción y del al menos un pozo de reinyección en base a las características y situación de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.

25 En una realización preferente, cada uno de los al menos un pozo de extracción comprende al menos un medio para la extracción de agua, más preferentemente un medio para la extracción de agua. Cada uno de dicho al menos un medio para la extracción de agua comprende al menos una tubería de extracción y al menos una bomba de extracción; más preferentemente una tubería de extracción y una bomba de extracción, conectando dicha tubería de extracción
30 el pozo de extracción con al menos un tanque para almacenar agua recirculada.

Dicha al menos una tubería de extracción presenta, preferentemente, al menos un medio de muestreo, más preferentemente, uno. Adicionalmente, en una realización preferente, dicha al menos una tubería de extracción está aislada térmicamente, más preferentemente está
35 recubierta de material aislante térmico (califugadores).

También en una realización preferente, la al menos una bomba de extracción es una bomba peristáltica o una bomba sumergible.

- 5 El al menos un pozo de extracción, de forma preferente, comprende adicionalmente un sensor de presión configurado para medir el nivel de agua del pozo. Si el sensor de presión detecta un nivel de agua por debajo del establecido como nivel de agua mínimo del pozo de extracción, se detendrá el semiciclo de llenado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada (para evitar el secado del pozo).

10

Se contempla que el al menos un pozo de extracción comprenda adicionalmente al menos un sensor para medir uno o más de los siguientes parámetros: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox y pH. Preferentemente, el al menos un pozo de extracción comprende sensores para medir temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno

15 disuelto, potencial redox y pH.

De forma preferente, el diámetro interno del al menos un pozo de extracción es de al menos 100 mm, más preferentemente, entre 100 mm y 150 mm.

- 20 En una realización preferente, el al menos un pozo de reinyección comprende al menos un medio para la reinyección de agua. Dicho al menos un medio para la reinyección de agua comprende, preferentemente, al menos una tubería de reinyección y al menos una bomba de reinyección, más preferentemente una tubería de reinyección y una bomba de reinyección, conectando dicha tubería de reinyección el pozo de reinyección con al menos un tanque para
- 25 almacenar agua recirculada.

Dicha al menos una tubería de reinyección presenta, de forma preferente, al menos un medio de muestreo, más preferentemente, uno. También de forma preferente, la al menos una tubería de reinyección está aislada térmicamente, más preferentemente, la al menos una

30 tubería de reinyección está recubierta de material aislante térmico (califugadores).

También en una realización preferente, la al menos una bomba de reinyección es una bomba peristáltica o una bomba sumergible.

- 35 El al menos un pozo de reinyección, preferentemente, comprende adicionalmente un sensor

de presión configurado para medir el nivel de agua de dicho pozo. Si el sensor de presión detecta un nivel de agua por encima del establecido como nivel de agua máximo del pozo de reinyección se detendrá el semiciclo de vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada (para evitar que el pozo rebose).

5

Se contempla que el al menos un pozo de reinyección pueda comprender adicionalmente al menos un sensor adicional, por ejemplo, para medir uno o más de los siguientes parámetros: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox y pH.

10 De forma preferente, el diámetro interno del al menos un pozo de reinyección es de al menos 100 mm, más preferentemente entre 100 y 150 mm, aún más preferentemente entre 100 y 120 mm.

En una realización preferente cada uno del al menos un medio para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo comprende un tanque de almacenaje del tratamiento (en forma líquida) y un medio (preferentemente, una tubería y una bomba) para la inyección del tratamiento en la zona de transición acuífero-acuitardo.

15 Preferentemente, el medio para la inyección del tratamiento en la zona de transición acuífero-acuitardo permite la inyección del tratamiento en el al menos un pozo de reinyección.

Dicho tratamiento puede ser cualquier tratamiento conocido en el estado de la técnica apto para la descontaminación de aguas. Un experto en la materia, en función del tipo de contaminación presente en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar podrá determinar si dicho al menos un tratamiento es necesario y cuál se debe aplicar. Se contempla que se pueda aplicar más de un tratamiento simultáneo o sucesivo, en función de cada contaminante y emplazamiento contaminado. En una realización preferente la celda de la presente invención comprende medios para suministrar ácido láctico, aún más preferentemente medios para suministrar ácido láctico y medios para suministrar una solución tampón (preferentemente de bicarbonato de sodio y carbonato de sodio en medio acuoso). Preferentemente, cada uno de los tratamientos se inyecta a un caudal de entre 0,5 y 1,5 mL/min.

Se contempla que el al menos un tanque para almacenar agua recirculada sea cualquier tanque disponible en el estado de la técnica. De forma preferente, el al menos un tanque para almacenar agua recirculada es opaco, aún más preferentemente es de polietileno opaco.

35

En una realización más preferente, el al menos un tanque para almacenar agua recirculada comprende un volumen de decantación, un volumen útil y un volumen de cabeza (por este orden, desde la base hasta la parte superior del tanque), siendo el volumen útil el que se llena y vacía de agua en los semiciclos de llenado y vaciado de la celda de la presente invención.
5 Lo indicado anteriormente para el tanque para almacenar agua recirculada también es aplicable a cada uno de los tanques de almacenaje de tratamientos (uno o más).

Se contempla que la celda de la presente invención esté configurada (preferentemente,
10 mediante medios para el control automático del funcionamiento de la celda) para llevar a cabo semiciclos de llenado y vaciado consecutivos en los que:

a) en primer lugar se lleva a cabo un semiciclo de llenado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada en el que se llena el volumen útil del al menos un tanque para
15 almacenar agua recirculada mediante extracción de agua de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio de al menos un pozo de extracción.

b) a continuación, en el semiciclo de vaciado, se lleva a cabo el vaciado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, reinyectando el agua recirculada en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio de al menos un pozo de reinyección,
20 preferentemente junto con al menos un tratamiento.

Se contempla la repetición de las etapas a) y b) (es decir, de los semiciclos de llenado y vaciado) hasta obtener la descontaminación deseada.

Adicionalmente, en una realización preferente, la celda de recirculación de la presente invención comprende al menos un pozo de monitorización que comprende sensores para la monitorización de la calidad del agua, y así, poder verificar cómo está evolucionando el procedimiento de tratamiento del agua. Más preferentemente, la celda de la presente invención comprende tres pozos de monitorización:

- 30 - un primer pozo de monitorización situado aguas arriba de la celda;
- un segundo pozo de monitorización situado entre el pozo de extracción y el pozo de reinyección; y
- un tercer pozo situado aguas abajo de la celda.

35 En la realización más preferente (combinable con cualquiera de las realizaciones

mencionadas anteriormente), en la celda de recirculación de la presente invención:

- el al menos un pozo de extracción es un pozo de extracción;
 - el al menos un pozo de reinyección es un pozo de reinyección; y
 - el al menos un tanque para almacenar agua recirculada es un tanque para almacenar
- 5 agua recirculada.

Tal como se ha indicado anteriormente, el al menos un pozo de extracción (preferentemente, un pozo de extracción) y el al menos un pozo de reinyección (preferentemente, un pozo de reinyección) se posicionan en los extremos de la porción de zona de transición acuífero-
10 acuitardo a tratar (preferentemente, el conjunto de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar), en la dirección y sentido del flujo de agua subterránea, situándose el al menos un pozo de extracción (preferentemente, un pozo de extracción de agua subterránea) aguas abajo y el al menos un pozo de reinyección (preferentemente, un pozo de reinyección) aguas arriba.

15 Se contempla que si la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar es muy extensa se puedan colocar diversas celdas de recirculación de la presente invención tanto en paralelo como en serie, o ambas a la vez (formando una malla rectangular regular).

De forma preferente, en la celda de recirculación de la presente invención la distancia entre
20 el pozo de extracción y el de reinyección es de entre 4 y 8 metros, más preferentemente 6 metros.

En una realización preferente, la longitud de las zonas ranuradas del pozo de extracción (a través de cuya zona ranurada se extrae el agua recirculada en la zona de transición acuífero-
25 acuitardo a tratar) y del pozo de reinyección (a través de cuya zona ranurada se inyecta el agua recirculada y los tratamientos descontaminadores en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar) son idénticas al grosor de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar. Adicionalmente, de forma preferente, dichas zonas ranuradas se posicionan justamente frente a la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar, y ambos pozos se alinean en la dirección y
30 sentido del flujo de agua subterránea dentro de la celda, situándose el pozo de extracción aguas abajo y el pozo de reinyección aguas arriba.

La celda de recirculación de la presente invención por su especial configuración estructural y de funcionamiento (incluyendo los bajos caudales a los que funciona y el funcionamiento en
35 semiciclos de llenado y vaciado sucesivos) permite resolver los problemas técnicos presentes

en el estado de la técnica y mencionados anteriormente, tal y como se deriva del ejemplo incluido más adelante. Por tanto, la celda de recirculación de la presente invención permite la descontaminación efectiva de medios que globalmente (es decir, en conjunto) son de baja permeabilidad (es decir, medios de baja conductividad hidráulica). Como ya se describió anteriormente, estos medios están formados por la alternancia de numerosos niveles de baja permeabilidad (cada uno de ellos de grosor delgado, normalmente centimétrico); y niveles más permeables, cada uno de ellos también de grosor delgado (normalmente centimétrico). El resultado de esta alternancia de niveles es un medio que en conjunto es poco permeable (es decir de poca conductividad hidráulica), por ejemplo y preferentemente, del tipo zonas de transición acuífero-acuitardo.

Adicionalmente, la celda de recirculación de la presente invención se puede aplicar para la descontaminación abiótica o biótica de contaminantes orgánicos (por ejemplo, solventes halogenados, hidrocarburos en general, contaminantes emergentes del tipo pesticidas, productos farmacéuticos, incluidos los de farmacia veterinaria, contaminantes persistentes, etc...). También se puede utilizar para la descontaminación de, entre otros, nitrato en las mencionadas zonas de transición.

En el estado de la técnica no existen celdas de recirculación por semiciclos, pues todas las celdas que existen están diseñadas para acuíferos contaminados (es decir formaciones geológicas muy permeables), y no pueden trabajar en formaciones poco permeables contaminadas como aquellas para las que se ha diseñado la celda por semiciclos, tal y como se ha expuesto anteriormente. Además, las celdas para acuíferos funcionan de manera continua, están formadas por dos pozos, uno de extracción y otro de reinyección, ambos funcionando de forma continua. Por tanto, en dichas celdas del estado de la técnica el agua continuamente entra y sale de la celda, y a caudales elevados. En cambio, la celda de recirculación de la presente invención funciona por semiciclos y a caudales pequeños, de lo contrario la formación contaminada quedaría prácticamente en seco dentro de la formación geológica poco permeable a tratar. Si esto sucediese, toda la masa de contaminante que habría quedado almacenada dentro de los niveles de muy baja permeabilidad no sería eliminada. Esta situación sería insostenible, por lo que, cuando, posteriormente se desmantelase la celda y los niveles de agua se recuperasen, tendría lugar el efecto rebote mencionado anteriormente. Además, si la fuente de contaminación está formada por un líquido no acuoso más denso que el agua, éste tampoco se trataría, lo que, cuando se

recuperasen los niveles, daría lugar a nueva incorporación de contaminante al agua subterránea de la zona poco permeable.

5 Como se ha indicado anteriormente, el vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada coincide con la reinyección dentro de la celda del agua recirculada a través del al menos un pozo de reinyección. Esta reinyección se acompaña de la inyección de los correspondientes reactivo/s o tratamiento/s necesario/s. Tras circular a lo largo de la celda el agua recirculada (y los reactivos y/o tratamientos que aún no se han consumido, si es el caso), se vuelven a extraer a través del al menos un pozo de extracción situado aguas abajo del de
10 reinyección. El agua extraída se vuelve a almacenar en el al menos un tanque para almacenar agua recirculada, para iniciar de nuevo un semiciclo de llenado de ese tanque. El caudal de extracción y el de reinyección son muy pequeños. De esta forma (además de evitar una caída desmesurada de niveles y prácticamente el secado de la celda) se obtiene, sobre todo, una velocidad de flujo muy pequeña (preferentemente de entre 0,35 y 1,40 mm/min). Esta baja
15 velocidad asegura que las reacciones químicas y biogeoquímicas que posibilitan la degradación de los contaminantes tengan tiempo suficiente para producirse a lo largo del recorrido realizado por los tratamientos y/o reactivos dentro de la celda. Además de esto, y de manera simultánea a la degradación de la masa de contaminante que circula por los niveles más permeables de la formación tratada, el mayor tiempo de residencia de los reactivos a
20 causa de la pequeña velocidad del flujo generada, hace posible que los reactivos penetren por difusión molecular dentro de los niveles de más baja permeabilidad, permitiendo la degradación de la masa contaminante que se almacena en su interior y evitando el posterior efecto rebote cuando los niveles más permeables se han descontaminado (lo que permite ser muy preciso en la remediación).

25

Tal como se ha indicado anteriormente, en un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento para la descontaminación de una zona de transición acuífero-acuitardo, caracterizado porque comprende las etapas de:

30 Etapa a): Establecer al menos una celda de recirculación de la presente invención, de manera que entre el al menos un pozo de extracción y el al menos un pozo de reinyección quede incluida o englobada la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.

Etapa b): Etapa de semiciclo de llenado: Llenado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada mediante extracción de agua de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio del al menos un pozo de extracción.

35 Etapa c): Etapa de semiciclo de vaciado: A continuación, tras la etapa b), vaciado del volumen

útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada reinyectando el agua en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio del al menos un pozo de reinyección, preferentemente junto con al menos un tratamiento.

- 5 En el procedimiento de la presente invención se contempla que las etapas b) y c) (semiciclo de llenado y de vaciado, respectivamente), se repitan hasta obtener la descontaminación deseada.

10 La celda de recirculación de la presente invención y sus características son de acuerdo a lo explicado anteriormente en el primer aspecto de la presente invención.

Más preferente, en el procedimiento de la presente invención el llenado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada en la etapa b) se lleva a cabo a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min, más preferentemente a un caudal de entre 0,42 y 1,25 L/min, aún
15 más preferentemente a un caudal entre 0,58 y 0,94 L/min.

También más preferentemente, en el procedimiento de la presente invención, el vaciado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada en la etapa c) se lleva a cabo a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min, más preferentemente a un caudal de entre
20 0,83 y 3,75 L/min, aún más preferentemente a un caudal de 1,25 L/min.

En una realización preferente, la etapa b) (semiciclo de llenado) en el procedimiento de la presente invención dura entre 60 y 180 minutos; y la etapa c) (semiciclo de vaciado) dura entre 20 y 90 minutos.

25

Por tanto, en el procedimiento de la presente invención para el tratamiento de zonas de transición acuífero-acuitardo, se extrae agua de dicha zona por el al menos un pozo de extracción hasta el llenado de al menos un tanque para almacenar agua recirculada (semiciclo de llenado (etapa b)) y en el posterior semiciclo de vaciado (etapa c)) dicha agua recirculada
30 será reinyectada en el al menos un pozo de reinyección y circulará por la celda nuevamente hasta el al menos un pozo de extracción para ser extraída en el siguiente semiciclo de llenado.

En el procedimiento de la presente invención se contempla y resulta preferente que, antes de la etapa a) y/o de la etapa b), se lleva a cabo al menos un tratamiento previo de la zona de
35 transición acuífero-acuitardo a tratar. De forma preferente, dicho tratamiento se lleva a cabo

antes de la etapa a), por tanto, el al menos un tratamiento previo, preferentemente, se lleva a cabo antes de la puesta en marcha de la al menos una celda de recirculación de la presente invención, aún más preferentemente, antes de la construcción de la al menos una celda de recirculación de la presente invención. El tratamiento previo dependerá de la naturaleza de la contaminación a tratar. En una realización preferente el tratamiento previo es con el hierro metálico (Fe^0), más preferentemente con mZVI (hierro cero-valente a microescala, en inglés *microscale zerovalent iron*).

En el procedimiento de la presente invención, preferentemente, en la etapa b), si el nivel del agua del al menos un pozo de extracción baja por debajo del nivel de agua establecido como mínimo, se detiene el semiciclo de llenado. Este semiciclo se reemprende cuando, de manera natural, el nivel del agua en el correspondiente pozo de extracción se recupera, sobrepasándose el valor del nivel de agua establecido como mínimo en el pozo de extracción y se llega a un valor de nivel de agua (prefijado en el control automático de la celda) que se sitúa por encima de dicho valor mínimo (normalmente, al cabo de pocos minutos de recuperación natural de niveles en el pozo).

En el procedimiento de la presente invención, preferentemente, en la etapa c), si el nivel de agua en el al menos un pozo de reinyección el nivel de agua sube por encima del nivel establecido como máximo, se detiene el semiciclo de vaciado. Este semiciclo se reemprende cuando, de manera natural, el nivel del agua en el pozo de reinyección desciende (porque el agua recirculada se reinfiltro en la zona de transición acuífero-acuitardo) hasta una profundidad prefijada en el control automático de la celda (esta profundidad ha de ser la correspondiente al nivel estático natural del pozo de reinyección). En ese momento (preferentemente, el control automático de la celda) se pone de nuevo en marcha la bomba de reinyección hasta vaciar el volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada.

En el procedimiento de la presente invención, tal como se ha indicado anteriormente, en la etapa c), de forma preferente se inyecta en el pozo de reinyección al menos un tratamiento. Dicho al menos un tratamiento puede ser cualquier tratamiento conocido en el estado de la técnica apto para la descontaminación de aguas subterráneas. Un experto en la materia, en función del tipo de contaminación presente en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar podrá determinar si dicho al menos un tratamiento es necesario y cuál se debe aplicar. Se contempla que se pueda aplicar más de un tratamiento simultáneo o sucesivo, en función de

5 cada contaminante y emplazamiento contaminado. En una realización preferente este al menos un tratamiento aplicado en la etapa c) del procedimiento de la presente invención es ácido láctico, más preferentemente junto con una solución tampón (preferentemente de bicarbonato de sodio y carbonato de sodio en medio acuoso). Preferentemente, cada uno de los tratamientos se inyecta a un caudal de entre 0,5 y 1,5 mL/min.

Tal como se ha indicado anteriormente, la celda de recirculación de la presente invención comprende:

- 10 a) al menos un pozo de extracción que permite la extracción de agua de una zona de transición acuífero-acuitardo;
- b) al menos un pozo de reinyección que permite la reinyección de agua proveniente del tanque para almacenar agua recirculada en la zona de transición acuífero-acuitardo;
- c) al menos un tanque para almacenar agua recirculada; y
- 15 d) al menos un medio para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo,

caracterizada porque dicha celda está configurada para funcionar en semiciclos de llenado y vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, de manera que en el semiciclo de llenado del al menos un tanque de agua recirculada se extrae agua del al menos un pozo de extracción a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min para el llenado del mencionado al menos un tanque para almacenar agua recirculada (más preferentemente, a un caudal de entre 0,42 y 1,25 L/min); y en el semiciclo de vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, el agua de dicho tanque se reinyecta en el al menos un pozo de reinyección a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min (más preferentemente, a un caudal de entre 0,83 y 3,75 L/min).

La celda de recirculación de la presente invención abarca el volumen de subsuelo en el que, dentro de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar, el agua subterránea está contaminada (ver FIG. 1). Este volumen de subsuelo está contaminado porque o bien: 1) 30 contiene totalmente, o parcialmente, en su interior una fuente de contaminación que constantemente emite contaminante al flujo de agua subterránea dando lugar a un penacho de contaminación, o 2) contiene totalmente, o parcialmente, en su interior un penacho de contaminación.

En el primer caso, el objetivo de la celda de la presente invención es eliminar la fuente de contaminación, y con ello también el penacho asociado. En el segundo caso, el objetivo es eliminar el penacho de contaminación que ya se había desplazado aguas abajo de la fuente de contaminación previamente eliminada.

5

Tal como se ha indicado anteriormente, si las dimensiones de la fuente de contaminación y/o del penacho son muy grandes (por lo que la porción de zona de transición acuífero-acuitardo que necesita ser tratada es también muy grande, de acuerdo con las dimensiones de la menciona fuente y/o penacho), se pueden colocar diversas celdas de recirculación de la presente invención, en serie o en paralelo, de forma que, en conjunto, todo el volumen de fuente contaminante y agua contaminada a tratar quede contenido dentro del solapamiento de todas las celdas de la presente invención utilizadas.

10

En la FIG. 1, se muestra un esquema general de la celda de recirculación de la presente invención 1 que comprende un pozo de extracción 2 y un pozo de reinyección 3 posicionados en los extremos de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar (en líneas discontinuas), en la dirección y sentido del agua subterránea. La dirección de las flechas muestra el flujo de agua tanto fuera de la celda de recirculación 1, en flechas de líneas continuas, como dentro de la celda de recirculación 1, en flechas de líneas discontinuas. Por tanto, el pozo de extracción 2 está situado aguas abajo y el pozo de reinyección 3 está situado aguas arriba de la celda de recirculación.

15

20

El flujo reflejado dentro de la celda de recirculación 1 y que va del pozo de extracción 2 al pozo de reinyección 3 muestra el agua recirculada (flechas de líneas discontinuas).

25

En la celda de recirculación 1 de la presente invención, la distancia entre el pozo de extracción 2 y el de reinyección 3 la debe determinar el experto en la materia en función de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar. Sin embargo, preferentemente la distancia entre el pozo de extracción 2 y el de reinyección 3 es de entre 4 y 8 metros, más preferentemente 6 metros.

30

Tal como se ha indicado anteriormente, la celda de recirculación 1 de la presente invención, preferentemente se debería dotar de, al menos, tres pozos de monitorización (FIG. 1). Los tres dotados de sensores de presión para el control del nivel de agua en cada pozo, y distribuidos del siguiente modo:

35

- 1) Un primer pozo de monitorización A 4 situado a una distancia de 2 o 3 metros aguas arriba de la celda (o sea, aguas arriba del pozo de reinyección 3). Su objetivo es monitorizar el agua contaminada no recirculada aguas arriba de la celda. Este sería el caso en que la celda de recirculación 1 sólo abarcara parcialmente una fuente de contaminación y/o un penacho de contaminación. En estos casos, como se ha indicado anteriormente, otras celdas de la presente invención deberían solaparse con ésta (si el objetivo final es la remediación total del emplazamiento).
- 2) Un segundo pozo de monitorización B 5 en el centro de la celda, para monitorizar el agua recirculada que se está descontaminando en el interior de la celda de recirculación 1.
- 3) Un tercer pozo de monitorización C 6 se sitúa unos 2 o 3 m aguas abajo de la celda (o sea, aguas abajo del pozo de extracción 2). Este pozo 6 monitoriza el agua subterránea situada aguas abajo de la celda 1 y, por tanto, no tratada. Su función es similar a la de los casos mencionados para el primer pozo de monitorización 4 situado aguas arriba de la celda 1.
- Estos tres pozos de monitorización, 4, 5 y 6, están dotados de sensores de presión para el registro continuo de niveles y parámetros físicos y químicos que permiten hacer un seguimiento continuo y en tiempo real de la evolución de la remediación. Al mismo tiempo, el pozo de monitorización 5, y el pozo de extracción 2, permiten periódicamente tomar muestras de agua recirculada (y, por tanto, tratada) para verificar que, más allá de los sensores de parámetros en continuo, la progresión de la remediación o descontaminación se está desarrollando de manera adecuada.
- En la FIG. 2 se muestra el detalle de un pozo de extracción 2 que comprende una tubería de extracción 7 que conecta el pozo de extracción 2 con el tanque para almacenar agua recirculada 8 y que, junto con la bomba de extracción 9 permite la extracción de agua y el llenado del tanque para almacenar agua recirculada 8 durante el semiciclo de llenado. En la FIG. 2 también se puede observar las diferentes capas del terreno: Zona no saturada (D), Acuífero (E), Zona de transición acuífero-acuitardo (F) y Acuitardo (G). Se observa como el pozo de extracción 2 presenta la profundidad necesaria para llegar a la Zona de transición acuífero-acuitardo (F) a tratar. Adicionalmente, las flechas negritas muestran cómo el agua de la Zona de transición acuífero-acuitardo (F) entra en el pozo de extracción 2.

Tal como se ha explicado anteriormente, la zona ranurada 32 del pozo de extracción 2 tiene la longitud necesaria como para situarse justamente entre la profundidad del techo de la zona de transición acuífero-acuitardo y la base de dicha formación hidrogeológica a tratar.

5 En la FIG. 2 se muestra también el sensor de presión de agua 10 destinado a medir la longitud de la columna de agua presente en el pozo de extracción 2, así como otros sensores 11,12,13 destinados a medir otras variables como temperatura, pH, oxígeno disuelto o potencial redox, entre otros (estos otros sensores 11, 12, 13) miden, registran y almacenan a intervalos de tiempo previamente fijados (por ejemplo, a un intervalo de medición minutil o cincominutil) la
10 variación temporal de dichos parámetros).

La bomba de extracción 9, que se muestra en la FIG. 6, es de pequeño caudal (ver dos ejemplos de caudal incluidos en la Tabla 1). Este caudal, tal y como se ha indicado anteriormente, ha de ser necesariamente pequeño para posibilitar una velocidad de flujo
15 subterráneo lento dentro de la celda 1, lo que da tiempo a que las reacciones químicas y biogeoquímicas que transforman los contaminantes tengan lugar. La bomba de extracción 9 está dotada de un sistema de control de caudal que permite ajustar este parámetro hasta el valor de operación que se considere adecuado para cada caso. La bomba de extracción puede ser sumergida o no sumergida, pero siempre ha de ser capaz de elevar agua a pequeño
20 caudal. Si se trata de una bomba de extracción de tipo peristáltico, ésta se sitúa en el exterior del pozo de extracción, y si se trata de una bomba de extracción sumergida, su sistema de control de caudal se halla en el exterior del pozo. En el caso de que la bomba de extracción sea peristáltica, ésta está conectada a la tubería de extracción 7. El extremo de succión del agua subterránea (zona de succión 14) de la tubería de extracción 7), se halla por debajo del
25 nivel de seguridad 1 (SL1). En el caso de que se trate de una bomba de extracción sumergida, es el propio cuerpo de la bomba de extracción el que constituye la zona de succión 14 de la tubería de extracción 7, situándose por debajo del nivel de seguridad (SL1).

El sensor de presión de agua 10, tal como se ha indicado anteriormente, mide el nivel de la
30 columna de agua en el pozo de extracción 2 y si dicho nivel desciende hasta el valor fijado como nivel de seguridad 1 (SL1), la bomba de extracción 9 se detiene para evitar que la zona de succión 14 de la tubería de extracción 7, a través de la cual la bomba de extracción 9 extrae agua subterránea, quede en seco. Para ello, el valor del SL1 ha de situarse por encima de la profundidad a la que se halla la mencionada zona de succión 14 de agua subterránea. Se
35 puede alcanzar el valor SL1 si el caudal de extracción excede al del caudal de reinyección en

el pozo de reinyección produciendo un descenso significativo del nivel en el pozo de extracción, que baja hasta el valor correspondiente al SL1. También se puede alcanzar el valor SL1 por diversas circunstancias (naturales o antrópicas) a lo largo de la descontaminación que hagan que se pueda dar una caída de nivel importante en el pozo de extracción. Por ejemplo, durante la puesta en marcha de la celda hasta ajustar un adecuado caudal de extracción y de reinyección, como causa antrópica. También puede ocurrir que el nivel descienda de manera natural durante el verano, provocando que, aunque el caudal de extracción sea pequeño, sea lo suficientemente grande como para que el nivel llegue a situarse a la altura de SL 1. Un caso similar, pero de carácter antrópico, sería que se pusiesen en funcionamiento pozos ajenos al de descontaminación de la presente invención y que hiciesen descender el nivel.

Tabla 1. Ejemplos de operación del pozo de extracción en una celda de recirculación de la presente invención

Pozo de extracción	Opciones	Tiempo de extracción (min)	Caudal de extracción (L/min)
	Opción 1	180	0.42
	Opción 2	60	1.25

En la FIG. 3 se muestra el detalle de un pozo de reinyección 3 que comprende una tubería de reinyección 15 que conecta el tanque para almacenar agua recirculada 8, FIG. 4, con el fondo del pozo de reinyección 3 y que, junto con la bomba de reinyección 16, FIG. 6, permite la reinyección de agua y el vaciado del tanque para almacenar agua recirculada 8 durante el semiciclo de vaciado. En la FIG. 3 también se puede observar las diferentes capas del terreno: Zona no saturada (D), Acuífero (E), Zona de transición acuífero-acuitardo (F) y Acuitardo (G). Se observa cómo el pozo de reinyección 3 presenta la profundidad necesaria para llegar a la Zona de transición acuífero-acuitardo (F) a tratar. Adicionalmente, las flechas negritas muestran cómo el agua sale del pozo de reinyección 3 y entra en la Zona de transición acuífero-acuitardo (F).

Tal como se ha explicado anteriormente, el pozo de reinyección 3 tiene la profundidad necesaria para llegar a la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar. La zona ranurada 18

de este pozo abarca desde la parte superior de la mencionada zona de transición a tratar hasta la base de dicha zona.

5 En la FIG. 3 se muestra también el sensor de presión de agua 17 destinado a medir la longitud de la columna de agua presente en el pozo de reinyección 3.

La bomba de reinyección 16 es de pequeño caudal (ver dos ejemplos de caudal incluidos en la Tabla 2). Este caudal, tal y como se ha indicado anteriormente, ha de ser necesariamente pequeño para posibilitar una velocidad de flujo subterráneo lento dentro de la celda 1, lo que da tiempo a que las reacciones químicas y biogeoquímicas que transforman los contaminantes tengan lugar. La bomba de reinyección 16 está dotada de un sistema de control de caudal que permite ajustar este parámetro hasta el valor de operación que se considere adecuado para cada caso. La bomba de reinyección puede ser sumergida o no sumergida, pero siempre ha de ser capaz operar a pequeño caudal. Si se trata de una bomba de reinyección de tipo peristáltico, ésta se sitúa en el exterior del pozo de reinyección 3, y si se trata de una bomba de reinyección sumergida, su sistema de control de caudal se halla en el exterior del pozo.

20 El sensor de presión de agua 17, tal como se ha indicado anteriormente, mide el nivel de la columna de agua en el pozo de reinyección 3, y si dicho nivel asciende hasta al valor fijado como nivel de seguridad 2 (SL2), la bomba de reinyección 16 se detiene para evitar que el pozo de reinyección 3 rebose. Es decir, este sensor de presión de agua 17 detecta o indica que el nivel del agua reinyectada en el pozo de reinyección 3 es muy elevado y hay peligro de que esta agua rebose por el brocal del pozo de extracción 3 y salga al exterior. Esta situación se puede dar si la formación geológica no es capaz de absorber el caudal de reinyección en el pozo de reinyección 3, o si se produce un taponamiento biológico o abiótico en la zona ranurada 18 en el pozo de reinyección 3 (o incluso en la propia formación geológica).

30 Tabla 2. Ejemplos de operación del pozo de reinyección en una celda de recirculación de la presente invención

Pozo de reinyección	Opciones	Tiempo de reinyección (min)	Caudal de reinyección (L/min)
	Opción 1	90	0.83
	Opción 2	20	3.75

En la FIG. 3, también se observan las primera y segunda tuberías de inyección de tratamientos 19, 20.

La FIG. 4 muestra el tanque para almacenar agua recirculada 8. Dicho tanque 8 es preferentemente cilíndrico y de polietileno opaco (u otro plástico resistente). A dicho tanque 8, tal y como se observa en esta figura, por la parte de arriba entra la tubería de extracción 7 (que viene del pozo de extracción 2) y, dentro del tanque, desciende hasta una zona cercana a la base, aproximadamente a 4 centímetros por debajo de la parte superior del volumen de decantación 8.1, de forma que esté siempre sumergida (de esta manera, se evita al máximo la aireación por borboteo del agua recirculada que va llenando el tanque y se minimizan cambios en las condiciones redox de este agua antes de que vuelva a ser reinyectada en la celda 1). Por la zona de la base del tanque 8 (zona de volumen de decantación 8.1), sale la tubería de reinyección 15 (que va al pozo de reinyección 3). El tanque para almacenar agua recirculada 8 presenta tres zonas, de abajo a arriba (de parte inferior a superior del tanque 8): un volumen de decantación 8.1 (actúa como decantador de posibles entradas de materiales finos procedentes del pozo de extracción 2, o de precipitados sólidos que se puedan formar durante el proceso de recirculación y almacenamiento dentro del tanque 8; estos materiales finos podrían obstruir las tuberías si éstas no disponen de suficiente gradiente), un volumen útil 8.2 y un volumen de cabeza 8.3. Para un tanque 8 de 120L (este volumen es el que contendría, por ejemplo, un tanque de 45 cm de diámetro y 75,5 cm de altura) el volumen de decantación 8.1 sería de 25L, el volumen útil 8.2 sería de 75L y el volumen de cabeza 8.3 sería de 20L. El tanque 8 presenta en el fondo un sensor de presión 22 para medir la columna de agua presente en el tanque y, en consecuencia, la cantidad o volumen de agua presente en el tanque 8 y poder así determinar los semiciclos de llenado y vaciado. Cuando ese volumen es de solo 25 L, se corresponde con el volumen de decantación 8.1, indica que el semiciclo de vaciado del tanque 8 ha llegado a su fin (porque se ha llegado ya hasta el volumen de decantación 8.1) por lo que se da la orden de parar a la bomba de reinyección 16, con lo que cesa la reinyección. Al mismo tiempo, se da la orden de puesta en marcha de la bomba de extracción 9 y comienza un semiciclo de llenado del tanque 8. Cuando el sensor de presión 22 situado en el fondo del tanque 8 indica una columna de agua correspondiente a la suma del volumen de decantación 8.1, 25 L y del volumen útil 8.2, 75L, es la señal de que el volumen útil 8.2 está completo y que por tanto el tanque 8 está lleno hasta 100 L. En ese momento, se da la orden de que se detenga la bomba de extracción 9 en el pozo de extracción 2 dándose por finalizado el semiciclo de llenado y, al mismo momento, iniciándose un semiciclo de vaciado.

Aunque la tapadera del tanque 8 debe estar perfectamente cerrada en todo momento, la pared del tanque 8 dispone en su parte superior de una perforación de ventilación 33 de dos o tres milímetros de diámetro, que la atraviesa de lado a lado, y que actúa como respiradero para evitar que se genere el vacío en el tanque durante su vaciado y que éste se deforme por implosión.

La FIG. 5 muestra un tanque para el almacenamiento de un tratamiento 21 (preferentemente cilíndrico y de polietileno opaco u otro plástico resistente). Dicho tanque 21 en una zona cercana a su base presenta (zona del volumen de decantación 21.1) la tubería de inyección de tratamientos 19 que conecta el tanque 21 con el pozo de reinyección 3 y permite inyectar en dicho pozo 3 el tratamiento contenido en el tanque 21. El tanque para el almacenamiento de un tratamiento 21 presenta tres zonas, de abajo a arriba: un volumen de reserva 21.1 (volumen de reserva de reactivo o tratamiento), un volumen útil 21.2 y un volumen de cabeza 21.3. Para un tanque 21 de 100L el volumen de reserva 21.1 sería de 15L, el volumen útil 21.2 sería de 75L y el volumen de cabeza 21.3 sería de 10L. El tanque 21 está preferentemente dotado de un dispositivo visual (o electrónico) que indica el nivel de solución de reactivo o tratamiento presente en su interior (no mostrado en la figura). Evidentemente el dispositivo indicador de nivel ha de ser resistente al reactivo o tratamiento contenido por el tanque 21. Aunque la tapadera del tanque 21 debe estar perfectamente cerrada en todo momento, la pared del tanque 21 dispone en su parte superior de una perforación de ventilación 34 de dos o tres milímetros de diámetro, que la atraviesa de lado a lado, y que actúa como respiradero para evitar que se genere el vacío en el tanque durante su vaciado y que éste se deforme por implosión.

Se contempla que la celda de recirculación 1 de la presente invención disponga de un sistema de envío de los datos captados por los diferentes sensores que comprende a un servidor central. En este caso, se puede evaluar en tiempo real la evolución de la remediación o tratamiento dentro del perímetro de la zona de influencia de la celda.

La FIG. 6 muestra un esquema del funcionamiento de la celda de recirculación 1 de la presente invención. Una vez extraída el agua recirculada a lo largo de la celda a través del pozo de extracción 2, ésta, por medio de la bomba de extracción 9 y a través de la tubería de extracción 7 llega al tanque para almacenar agua recirculada 8 que se llena durante el semiciclo de llenado. En el caso del pozo de extracción 2, la tubería de extracción 7, está, preferentemente, dotada de un grifo 30, que permite realizar muestreos (este grifo 30 se halla,

por tanto, en un punto del recorrido de la tubería de extracción 7) situado inmediatamente después de salir del pozo de extracción 2 y antes de entrar en el tanque 8). Una vez el volumen útil 8.2 del tanque para almacenar agua recirculada 8 se ha llenado, se da por finalizado el semiciclo de llenado (y, por tanto, se para la extracción de agua del pozo de extracción 2). En este momento se inicia el semiciclo de vaciado en el que se vacía el volumen útil 8.2 del tanque para almacenar agua recirculada 8. Para ello, el agua es impulsada desde el tanque 8 al pozo de reinyección 3 mediante la bomba de reinyección 16 a través de la tubería de reinyección 15. La tubería de reinyección 15 está dotada de un grifo 23 que permite realizar muestreo. Este grifo 23 se halla en un punto del recorrido de la tubería de reinyección 15 situado después del tanque 8 y antes de que la tubería de reinyección 15 entre en el pozo de reinyección 3.

En la FIG. 6, aparecen también representados medios para el almacenamiento y la inyección de dos tratamientos, que se ponen en funcionamiento para la inyección de uno o más tratamientos en el pozo de reinyección 3 en el semiciclo de vaciado (es decir, junto con la reinyección de agua recirculada se produce la inyección de los uno o más tratamientos durante el semiciclo de vaciado). En la FIG. 6, los medios para el almacenamiento y la inyección de dos tratamientos comprenden un primer tanque para almacenar un primer tratamiento 21 que mediante una primera tubería de inyección 19 y una primera bomba de inyección 24 inyectan un primer tratamiento o reactivo en el pozo de reinyección 3; y un segundo tanque para almacenar un segundo tratamiento 25 que mediante una segunda tubería de inyección 20 y una segunda bomba de inyección 26 inyectan un segundo tratamiento o reactivo en el pozo de reinyección 3. Tanto la primera tubería de inyección 19 como la segunda tubería de inyección 20 presentan un grifo 27, 28 que permite realizar muestreos y verificar el funcionamiento de las bombas de inyección 24, 26. En este sentido, en la FIG. 6 se ha representado el caso de dos tratamientos, aunque puede haber tantos como sea necesario en función de la contaminación a tratar. En una realización preferente el primer tratamiento es ácido láctico y el segundo tratamiento es una solución tampón de bicarbonato de sodio y carbonato de sodio en medio acuoso. Durante el tiempo que dura la reinyección de agua recirculada, las dos bombas de inyección 24, 26 inyectan directamente en el pozo de reinyección 3 un número determinado de dosis de cada tratamiento a través de las correspondientes tuberías de inyección 19, 20. Esta inyección se realiza siempre por debajo del nivel del agua en el pozo de reinyección 3. Las dos bombas de inyección 24, 26 pueden ser peristálticas o sumergidas. La finalidad de inyectar las dosis de tratamiento en la manera indicada es que estas dosis de solución de tratamiento sean arrastradas por el agua

recirculada a lo largo de la celda 1 para llevar a cabo el tratamiento de la zona acuífero-acuitardo a tratar por dispersión y difusión molecular.

5 Tal como se ha indicado, cada uno de los ciclos de funcionamiento de la celda de recirculación 2 de la presente invención está formado por dos semiciclos sucesivos (no concurrentes), uno de llenado del tanque para almacenar agua recirculada 8 y otro de vaciado del mismo.

De forma preferente, todas las tuberías de la celda de recirculación 1 de la presente invención están recubiertas de material aislante térmico (califugadores) para evitar la congelación del
10 agua que transportan en época invernal.

Finalmente, hay que indicar que se contempla y de hecho resulta preferente que la celda de recirculación de la presente invención 1 presente un sistema para el control automático de la celda 1 y de su funcionamiento, por ejemplo, un panel de control eléctrico automático 29 que
15 recibe la información de todos los sensores y controla de forma automática todas las bombas de la celda de recirculación de la presente invención 2.

Para una mejor comprensión, la presente invención se describe en más detalle a continuación en referencia al siguiente ejemplo no limitativo.

20

Ejemplo. Prueba piloto de movilización de fuentes de PCE en la zona de transición a los acuitardos (zona de transición acuífero-acuitardo) mediante la combinación de mZVI y bioestimulación con ácido láctico con una celda de recirculación de la presente invención

25 Materiales y métodos: Diseño y puesta en marcha de una celda de la presente invención. La ejecución de la prueba piloto consistió en dos etapas. En la primera etapa, se perforaron seis sondeos para la inyección de mZVI de 8 metros de profundidad por rotación y con recuperación continua de testigos de sondeo siguiendo las directrices proporcionadas por Puigserver et al. (Puigserver, D., Herrero, J., Torres, M., Cortés, A., Nijenhuis, I., Kuntze, K.,
30 ... & Carmona, J. M. (2016). *Reductive dechlorination in recalcitrant sources of chloroethenes in the transition zone between aquifers and aquitards*. Environmental Science and Pollution Research, 23(18), 18724-18741.). La inyección de una emulsión acuosa de mZVI y goma guar (ambas de calidad alimentaria) se llevó a cabo en los seis pozos utilizando el agua subterránea de los pozos perforados (la FIG. 7 muestra la ubicación de los sondeos no entubados para la
35 inyección de mZVI 31). El método de inyección de mZVI en cada pozo fue la presión

hidrostática, siempre de abajo hacia arriba entre 8 y 4,5 m de profundidad. La masa total de mZVI inyectada fue de 30 kg (5 en cada pozo de inyección). Con la inyección de mZVI en el sexto sondeo, el último, se inició la prueba piloto. Este momento se considera el día cero de la prueba (tiempo 0 días).

5

En una segunda etapa, se activó la celda de recirculación de la presente invención el día 149 después del inicio de la prueba (tiempo 149 días) para inyectar la solución de ácido láctico utilizada en la bioestimulación (la FIG. 7 muestra la zona de influencia de esta celda de recirculación).

10

La FIG. 7 muestra: 7A Zona de influencia de la celda de recirculación 1 (limitada por las líneas de flujo más externas). Ubicación de los seis sondeos no entubados para la inyección de mZVI 31 (de la emulsión de mZVI y goma guar) y ubicación también del pozo de extracción 2 y de reinyección 3 de agua recirculada y de ácido láctico. 7B Sección vertical de los sondeos no entubados para la inyección de mZVI 31 y de la celda de recirculación 1 de la presente invención mostrando el pozo de extracción 2, el pozo de reinyección 3, el tanque para almacenar agua recirculada 8 y el tanque 21 de solución de ácido láctico. Las flechas indican la circulación del agua dentro de la celda de recirculación 1.

15

20

La celda de recirculación de la presente invención se diseñó para bioestimular la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar. Dada la baja conductividad hidráulica de esta zona de transición, la celda se diseñó para operar en semiciclos de llenado y vaciado de un tanque de recirculación de agua para evitar que el pozo de extracción se secase y dar tiempo a la reinyección. Además, interesaba obtener una velocidad lenta del agua subterránea para que el tiempo de residencia del ácido láctico en el medio fuera lo suficientemente largo como para favorecer las reacciones de degradación de los cloroetenos.

25

La celda de recirculación de la presente invención estaba formada por:

30

1) un pozo de extracción 2, ranurado 32 en la zona de transición acuífero-acuitardo y equipado con una bomba peristáltica que extraía caudales que oscilaban entre 0,58 y 0,94 L/min (este pozo también tenía un sensor de presión de la columna de agua que controlaba el nivel del agua entre los valores máximos y mínimos preestablecidos);

35

2) un tanque para almacenar agua recirculada 8 que almacenaba hasta 100 L de agua recirculada, lo que permitía la reinyección de 75 L de esa agua en cada ciclo de llenado-vaciado;

3) dos tanques 21 y 25 de 30 L de capacidad, cada uno almacenaba reactivos (un tanque para una solución de ácido láctico y el otro una solución tampón compuesta por un 80% de bicarbonato de sodio y un 20% de carbonato de sodio);

4) ambos tanques mencionados en el punto 3 estaban conectados a bombas peristálticas que dosificaban el ácido láctico y la solución tampón (con caudales que iban de 0,5 a 1,5 mL/min);
y

5) un pozo de reinyección 3.

Durante la prueba piloto de forma semicíclica (durante casi un año, entre los días 149 y 504; es decir, 355 días), se inyectó un total de 13,03 kg de ácido láctico, concretamente de ácido (S)-láctico, también llamado ácido (S)-2-hidroxiopropiónico (IUPAC) de calidad alimentaria. El ácido láctico y la solución tampón se inyectaron a 6 m de profundidad en el pozo de reinyección, ranurado en la parte superior del acuífero y en la zona de transición acuífero-acuitardo. Este pozo también estaba equipado con una bomba peristáltica conectada al tanque para almacenar agua recirculada y se reinyectaba el agua recirculada a un caudal de 1,25 L/min. Como en el caso del pozo de extracción, este pozo estaba equipado con un sensor de presión de la columna de agua que regulaba el nivel entre los valores máximo y mínimo preestablecidos. Si se alcanzaba el nivel máximo se apagaban automáticamente la bomba de reinyección y las dos bombas de dosificación, evitando así el derrame del agua reinyectada que no tenía tiempo de reinfiltrarse en el pozo.

La red de monitorización de la prueba piloto estaba formada por un pozo multinivel, y los dos pozos que conformaron la celda. Los datos sobre las principales características de los puntos de monitorización de la prueba piloto se pueden encontrar en la Tabla 3 incluida más adelante.

25

Tabla 3. Características de los puntos de monitorización de la prueba piloto. P1 (pozo de extracción), P2 (pozo de reinyección). F1UB (sistema multinivel CMT de Solinst), tres puertos en la zona de transición. HDPD (polietileno de alta densidad). TEFLON™ (politetrafluoroetileno, PTFE). Prof. (profundidad), Tipo revest. (tipo de tubería de revestimiento), Diam. Int. (diámetro interior de la tubería de revestimiento), Diam. ext. (diámetro exterior de la tubería de revestimiento), Long. ran. (longitud de la zona ranurada), Rango prof. zona ran. (Rango de profundidad de la zona ranurada), Long. tub. ciega (longitud de la tubería ciega).

30

Pozo	Puertos	Prof. (m)	Tipo revest.	Diam. Int. (cm)	Diam. ext. (cm)	Long. ran. (cm)	Rang. prof. zona ran. (cm)		Long. tub. ciega (cm)	
							inicio	fin	inicio	fin
P1	-	8	HDPE	10,8	11,0	200	600	800	0	600
P2	-	6,5	HDPE	10,8	11,0	210	440	650	0	440
F1UB	5	6,18	TEFLON	-	12,7	2,1	612	614,1	-	-
	6	6,66	TEFLON	-	12,7	2,1	659	661,1	-	-
	7	7,2	TEFLON	-	12,7	2,1	712	744,1	-	-

Control de las aguas subterráneas durante la prueba piloto y métodos analíticos

5 La prueba piloto comenzó en el momento correspondiente al día 0 (primer día de muestreo), cuando se inyectó mZVI. Este reactivo actuó solo durante los primeros 149 días. Al finalizar este periodo (día 149), se activó la celda de recirculación de la presente invención y entró en funcionamiento el tratamiento combinado de mZVI y bioestimulación con ácido láctico durante un total de 355 días (es decir, hasta el día 504, ver Tabla 4).

10 Tabla 4. Días desde el inicio de la prueba piloto en los que se tomaron muestras de aguas subterráneas en la red de control. La primera muestra (día 0) se tomó inmediatamente antes de la inyección de mZVI. Los días en los que también se tomaron muestras de aguas subterráneas para identificar microorganismos están marcados con una "X".

Días de muestreo de aguas subterráneas en la red de control (días desde el inicio de la prueba piloto)				
0	Inyección de mZVI		259	-
99	-		294	X
149	Puesta en marcha de la celda	X	321	X
169	-		341	-
177	-		356	X
202	X		373	-
212	-		400	X
222	-		427	-

231	-	449	-
243	-	467	-
253	-	504	Parada y cierre de la celda (*)

(*)final de la prueba piloto

A continuación, se describen brevemente los procedimientos seguidos para el muestreo de aguas subterráneas en la red de seguimiento. Antes del muestreo y de acuerdo con Puigserver et. al. (Puigserver, D., Herrero, J., Parker, B. L., & Carmona, J. M. (2020). *Natural attenuation of pools and plumes of carbon tetrachloride and chloroform in the transition zone to bottom aquitards and the microorganisms involved in their degradation*. Science of The Total Environment, 712, 135679), los puntos de control se purgaron mediante una bomba peristáltica conectada a una célula de flujo de campo acoplada a sensores para parámetros fisicoquímicos. Los parámetros fueron el oxígeno disuelto (OD, mg/L), el potencial de reducción-oxidación (ORP, mV), el pH, la temperatura (T, °C) y la conductividad eléctrica (CE, µS/cm). Una vez estabilizados y registrados los valores de estos parámetros, se procedió a la toma de muestras de agua con la bomba peristáltica a bajo caudal para minimizar la volatilización de COVs (según Puigserver, D., Cortés, A., Viladevall, M., Nogueras, X., Parker, B. L., & Carmona, J. M. (2014). *Processes controlling the fate of chloroethenes emanating from DNAPL aged sources in river-aquifer contexts*. Journal of contaminant hydrology, 168, 25-40). Los protocolos de muestreo utilizados fueron los descritos por Puigserver et al. (2014). El orden de muestreo en campo fue: 1) 1L de agua (en botellas de vidrio autoclavadas) para la determinación de las comunidades microbianas en el agua subterránea (filos y géneros); esta agua fue posteriormente filtrada con filtros de 0,2 micras y congelada a -20 °C en el laboratorio según Puigserver et al. (2020). 2) 250 mL para determinar las concentraciones de cloroetenos, y otros COVs: dicloroacetileno (DCA), cloroacetileno (CA), y los gases eteno, etano, acetileno y metano, 3) 250 mL para determinar el $\delta^{13}\text{C}$ de los cloroetenos, 4) 100 mL para determinar las especies de nitrógeno, Mn^{2+} , Fe^{2+} , sulfato, S^{2-} y, finalmente, 5) 50 mL de agua para la determinación de lactato y acetato.

25

Las muestras se transportaron y almacenaron a 4 °C, y en cada campaña de muestreo se tomaron las siguientes muestras: 1 muestra de campo de evaluación y 1 muestra de campo de evaluación de bajas concentraciones. Cada muestra se tomó por duplicado y se recogió 1 blanco de campo, excepto en el caso de las muestras destinadas a la determinación microbiana, en las que se recogieron dos blancos, 1 blanco de blancos y 1 blanco de

30

transporte para cada refrigerador de transporte de muestras, con el fin de garantizar la trazabilidad y la representatividad de las muestras.

5 En el caso de las muestras para determinar las concentraciones de cloroetenos y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de estos compuestos, se añadió bactericida para inhibir la actividad bacteriana durante el transporte y el almacenamiento siguiendo el protocolo descrito en Puigserver et al. (2020). Todas las muestras fueron analizadas por el grupo de Hidrogeología Ambiental y Cambio Global de la Universidad de Barcelona en los laboratorios de los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiTUB), que siguen la norma ISO
10 9001:2000.

Los COVs presentes en las aguas subterráneas se analizaron mediante cromatografía de gases (GC) (Carlo-Erba GC8000-Top) acoplada a un espectrómetro de masas (GC-MS) (ThermoFinnigan Fisons MD800). Los compuestos analizados fueron percloroetileno (PCE),
15 tricloroetileno (TCE), cis-dicloroetileno (cDCE), trans-dicloroetileno (tDCE), 1,1-dicloroetileno (1,1-DCE), cloruro de vinilo (CV), dicloroacetileno, cloroacetileno y los gases eteno, etano, acetileno y metano.

Se aplicó el Análisis Isotópico Específico de Compuestos (CSIA) para determinar la
20 composición isotópica de los COV y los gases. Para ello, se utilizó la microextracción en fase sólida siguiendo el método descrito por Puigserver et al. (2014) y utilizando la Espectrometría de Masas de Relación Isotópica por Cromatografía de Combustión (GC-C-IRMS).

Las concentraciones de aniones se determinaron por cromatografía iónica, siguiendo el
25 protocolo EPA 9056. El Mn^{2+} , el Fe^{2+} y el S^{2-} se midieron por espectrofotometría de absorción con un Merck Spectroquant NOVA60. El lactato, el acetato y el formato se determinaron por cromatografía líquida (HPLC).

La extracción de ADN para la identificación de los filos y géneros de microorganismos en las
30 aguas subterráneas muestreadas se realizó en un ambiente estéril con el DNeasy Ultraclean Microbial Kit de Qiagen, con una adaptación de las dos primeras etapas, para extraer el ADN de los filtros. La preparación de la biblioteca de ARNr 16S, la secuenciación y el análisis bioinformático se realizó en la Unidad de Genómica de los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiTUB).

La región V3V4 del ARNr 16S se amplificó según lo descrito por Willis et al. (Willis, J., et al. (2018). *Citizen science charts two major "stomatotypes" in the oral microbiome of adolescents and reveals links with habits and drinking water composition*. *Microbiome*, 6(1), 1-17.) utilizando un conjunto de cebadores modificados V3-V4-F y V3-V4-R que contienen un "espaciador de heterogeneidad" de 1-4 pb que fueron diseñados para mitigar los problemas causados por los amplicones de baja diversidad de secuencias (los cebadores utilizados para la secuenciación del ARNr 16S se pueden encontrar en la Tabla 4). Se modificaron las condiciones de la PCR: una desnaturalización inicial a 95°C durante 3 minutos, seguida de 25 ciclos de tres pasos consistentes en 95°C durante 30 s, 55°C durante 30 s y 72°C durante 30 s; y una extensión final de 5 minutos a 72°C. Cada amplificación por PCR se llevó a cabo con 4 µl de ADN, 0,2-µM de cada cebador directo e inverso y Kapa ready mix (Kapa biosystems) en un volumen total de 10 µl.

Tras el primer paso de la PCR, se purificaron los productos de la PCR, se realizó una segunda PCR y una segunda purificación, seguidas de un proceso de normalización y cuantificación como el descrito por Willis et al. (2018).

La secuenciación se realizó en Illumina MiSeq con lecturas de 2 × 300 pares de bases utilizando el kit v3 (Bioo Scientific) con una concentración de carga de 18 pM. Para aumentar la diversidad de la secuenciación se introdujo un 10% de bibliotecas de control PhIX.

En este estudio se utilizaron tres muestras de comunidades simuladas. Dos comunidades bacterianas simuladas se obtuvieron de los Recursos BEI del Proyecto Microbioma Humano (HM-276D y HM-277D), cada una contenía ADN genómico de operones ribosómicos de 20 especies bacterianas. La tercera comunidad simulada, ZymoBIOMICS™ Microbial Community DNA Standard (Zymo Research, número de catálogo D6306), es una mezcla de ADN genómico aislado de cultivos puros de ocho cepas bacterianas y dos cepas fúngicas. Los ADNs de prueba se amplificaron y secuenciaron de la misma manera que las demás muestras experimentales.

Tal como se deriva de los resultados obtenidos (ver Tabla 5) y los incluidos anteriormente, en la remediación de la contaminación por solventes clorados, la utilización combinada de mZVI y biostimulación con ácido láctico de la flora microbiana del medio por medio de la celda de la presente invención resultó un método eficiente de para la eliminación de fuentes de

contaminación recalcitrantes situadas en zonas de transición del acuífero-acuitardo, objeto del tratamiento de la prueba piloto.

5 Se obtuvieron eficiencias en la eliminación que oscilaron entre un 83% y un 96% del PCE en pools situadas en la zona de influencia de la celda dentro de la zona de transición. La degradación de este PCE fue prácticamente total, llegándose hasta compuestos inocuos como etano, eteno y CO₂.

Tabla 5. Porcentaje de PCE original (el que existía en el tiempo 0) degradado al largo de la prueba piloto.

10

Tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba piloto (días)	PCE degradado durante la prueba piloto (%)				
	Puntos de monitorización (P1 pozo de extracción; P2 pozo de reinyección; F1 puertos 5, 6 y 7 del pozo multinivel)				
	P2	F1-5 UB	F1-6UB	F1-7UB	P1
0	0	0	0	0	0
99	9,7	43,1	16,00	41,3	25,5
400	93,0	84,1	89,79	96,3	83,4

REIVINDICACIONES

1. Celda de recirculación que comprende:
- al menos un pozo de extracción que permite la extracción de agua de una zona de transición acuífero-acuitardo a tratar;
 - al menos un tanque para almacenar agua recirculada;
 - al menos un pozo de reinyección que permite la reinyección en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar de agua proveniente del al menos un tanque para almacenar agua recirculada;
- 5
- 10 y
- al menos un medio para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar,
- caracterizada porque dicha celda está configurada para funcionar en semiciclos de llenado y vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, de manera que en el
- 15 semiciclo de llenado del al menos un tanque de agua recirculada se extrae agua del al menos un pozo de extracción a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min para el llenado del mencionado al menos un tanque para almacenar agua recirculada; y en el semiciclo de vaciado del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, el agua de dicho tanque se reinyecta en el al menos un pozo de reinyección a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min.
- 20
2. Celda de recirculación según la reivindicación 1, caracterizada porque el al menos un pozo de extracción tiene una zona ranurada y porque la longitud de la zona ranurada del al menos un pozo de extracción coincide con el grosor de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 25
3. Celda de recirculación según la reivindicación 1 ó 2, caracterizada porque el al menos un pozo de extracción tiene la profundidad necesaria para poder extraer agua de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 30
4. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizada porque el al menos un pozo de extracción llega hasta la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
5. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada porque el al menos un pozo de extracción llega hasta la base de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 35

- 5 6. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizada porque el al menos un pozo de reinyección tiene una zona ranurada y porque la longitud de la zona ranurada del al menos un pozo de reinyección coincide con el grosor de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 10 7. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque el al menos un pozo de reinyección tiene la profundidad necesaria para poder reinyectar agua a la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 15 8. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizada porque el al menos un pozo de reinyección llega hasta la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 20 9. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizada porque el al menos un pozo de reinyección llega hasta la base de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 25 10. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizada porque cada uno de los al menos un pozo de extracción comprende al menos un medio para la extracción de agua.
- 30 11. Celda de recirculación según la reivindicación 10, caracterizada porque cada uno de los al menos un medio para la extracción de agua comprende al menos una tubería de extracción y al menos una bomba de extracción, conectando dicha al menos una tubería de extracción el al menos un pozo de extracción con el al menos un tanque para almacenar agua recirculada.
- 35 12. Celda de recirculación según la reivindicación 11, caracterizada porque la al menos una tubería de extracción presenta al menos un medio de muestreo.
13. Celda de recirculación según la reivindicación 11 ó 12, caracterizada porque la al menos una tubería de extracción está aislada térmicamente.
14. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, caracterizada

porque la al menos una bomba de extracción es una bomba peristáltica o una bomba sumergible.

5 15. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizada porque cada uno de los al menos un pozo de extracción comprende adicionalmente un sensor de presión configurado para medir el nivel de agua del pozo.

10 16. Celda de recirculación según la reivindicación 15, caracterizada porque si el sensor de presión detecta un nivel de agua por debajo del establecido como nivel de agua mínimo del pozo de extracción se detendrá el semiciclo de llenado del tanque para almacenar agua recirculada.

15 17. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, caracterizada porque cada uno de los al menos un pozo de extracción comprende adicionalmente al menos un sensor para medir uno o más de los siguientes parámetros: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox y pH.

20 18. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17, caracterizada porque el diámetro interno del al menos un pozo de extracción es de al menos 100 mm.

19. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18, caracterizada porque cada uno de los al menos un pozo de reinyección comprende al menos un medio para la reinyección de agua.

25 20. Celda de recirculación según la reivindicación 19, caracterizada porque el al menos un medio para la reinyección de agua comprende al menos una tubería de reinyección y al menos una bomba de reinyección, conectando dicha al menos una tubería de reinyección el al menos un pozo de reinyección con el al menos un tanque para almacenar agua recirculada.

30 21. Celda de recirculación según la reivindicación 20, caracterizada porque la al menos una tubería de reinyección presenta al menos un medio de muestreo.

22. Celda de recirculación según la reivindicación 20 ó 21, caracterizada porque la al menos una tubería de reinyección está aislada térmicamente.

35

23. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 20 a 22, caracterizada porque la al menos una bomba de reinyección es una bomba peristáltica o una bomba sumergible.
- 5 24. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 23, caracterizada porque cada uno de los al menos un pozo de reinyección comprende adicionalmente un sensor de presión configurado para medir el nivel de agua de dicho pozo.
- 10 25. Celda de recirculación según la reivindicación 24, caracterizada porque si el sensor de presión detecta un nivel de agua por encima del establecido como nivel de agua máximo del pozo de reinyección se detendrá el semiciclo de vaciado del tanque para almacenar agua recirculada.
- 15 26. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 25, caracterizada porque el al menos un pozo de reinyección comprende adicionalmente al menos un sensor para medir uno o más de los siguientes parámetros: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox y pH.
- 20 27. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 26, caracterizada porque el diámetro interno del al menos un pozo de reinyección es de al menos 100 mm.
- 25 28. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 27, caracterizada porque cada uno de los medios para suministrar un tratamiento a la zona de transición acuífero-acuitardo comprende un tanque de almacenaje del tratamiento y un medio para la inyección del tratamiento en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.
- 30 29. Celda de recirculación según la reivindicación 28, caracterizada porque el medio para la inyección del tratamiento en la zona de transición acuífero-acuitardo permite la inyección del tratamiento en el al menos un pozo de reinyección.
- 35 30. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 29, caracterizada porque el al menos un tanque para almacenar agua recirculada es opaco.
31. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 30, caracterizada porque el al menos un tanque para almacenar agua recirculada es de polietileno opaco.

32. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 31, caracterizada porque el al menos un tanque para almacenar agua recirculada comprende un volumen de decantación, un volumen útil y un volumen de cabeza, siendo el volumen útil el que se llena y vacía de agua en los semiciclos de llenado y vaciado.
33. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 32, caracterizada porque adicionalmente comprende medios para el control automático del funcionamiento de la celda.
34. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 33, caracterizada porque está configurada para llevar a cabo semiciclos de llenado y vaciado consecutivos en los que:
- en primer lugar se lleva a cabo un semiciclo de llenado del al menos un tanque en el que se llena el volumen útil del tanque para almacenar agua recirculada mediante extracción de agua de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio de al menos un pozo de extracción;
 - a continuación, en el semiciclo de vaciado se lleva a cabo el vaciado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, reinyectando el agua recirculada en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio del al menos un pozo de reinyección, preferentemente junto con al menos un tratamiento; y
 - se repiten las etapas a) y b) hasta obtener la descontaminación deseada.
35. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 34, caracterizada porque comprende al menos un pozo de monitorización que comprende sensores para la monitorización de la calidad del agua.
36. Celda de recirculación según la reivindicación 35, caracterizada porque comprende tres pozos de monitorización:
- un primer pozo de monitorización situado aguas arriba de la celda;
 - un segundo pozo de monitorización situado entre en pozo de extracción y el pozo de reinyección; y
 - un tercer pozo situado aguas abajo de la celda.

37. Celda de recirculación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 36, caracterizada porque el al menos un pozo de extracción es un pozo de extracción; el al menos un pozo de reinyección es un pozo de reinyección; y el al menos un tanque para almacenar agua recirculada es un tanque para almacenar agua recirculada.

5

38. Celda de recirculación según la reivindicación 37, caracterizada porque el pozo de extracción y el pozo de reinyección se posicionan en los extremos de la porción de zona de transición acuífero-acuitardo a tratar, en el sentido o dirección del agua subterránea, situándose el pozo de extracción aguas abajo y el pozo de reinyección aguas arriba.

10

39. Celda de recirculación según la reivindicación 37 ó 38, caracterizada porque la distancia entre el pozo de extracción y el de reinyección es de entre 4 y 8 metros, más preferentemente 6 metros.

15

40. Procedimiento para la descontaminación de una zona de transición acuífero-acuitardo, caracterizado porque comprende las siguientes etapas:

a) establecer al menos una celda de recirculación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 39, de manera que entre el al menos un pozo de extracción y el al menos un pozo de reinyección quede incluida la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar;

20

b) realizar una etapa de semiciclo de llenado, llenando el volumen útil de al menos un tanque para almacenar agua recirculada mediante extracción de agua de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio de al menos un pozo de extracción;

25

c) realizar una etapa de semiciclo de vaciado, vaciando el volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada, reinyectando el agua en la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar por medio del pozo de reinyección, preferentemente junto con al menos un tratamiento; y

- repetir las etapas b) y c) hasta obtener la descontaminación deseada.

30

41. Procedimiento para la descontaminación según la reivindicación 40, caracterizado porque el llenado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada en la etapa b) se lleva a cabo a un caudal de entre 0,30 y 1,30 L/min.

35

42. Procedimiento para la descontaminación según la reivindicación 40 ó 41, caracterizado porque el vaciado del volumen útil del al menos un tanque para almacenar agua recirculada en la etapa c) lleva a cabo a un caudal de entre 0,80 y 3,80 L/min.

43. Procedimiento para la descontaminación según cualquiera de las reivindicaciones 40 a 42, caracterizado porque antes de la etapa a) y/o de la etapa b) se lleva a cabo al menos un tratamiento previo de la zona de transición acuífero-acuitardo a tratar.

5

44. Procedimiento para la descontaminación según cualquiera de las reivindicaciones 40 a 43, caracterizado porque si en la etapa b) el nivel del agua del al menos un pozo de extracción baja por debajo del nivel de agua establecido como mínimo, se detiene el semiciclo de llenado.

10 45. Procedimiento para la descontaminación según cualquiera de las reivindicaciones 40 a 44, caracterizado porque si en la etapa c) el nivel de agua en el al menos un pozo de reinyección sube por encima del nivel establecido como máximo, se detiene el semiciclo de vaciado.

15

FIGURAS

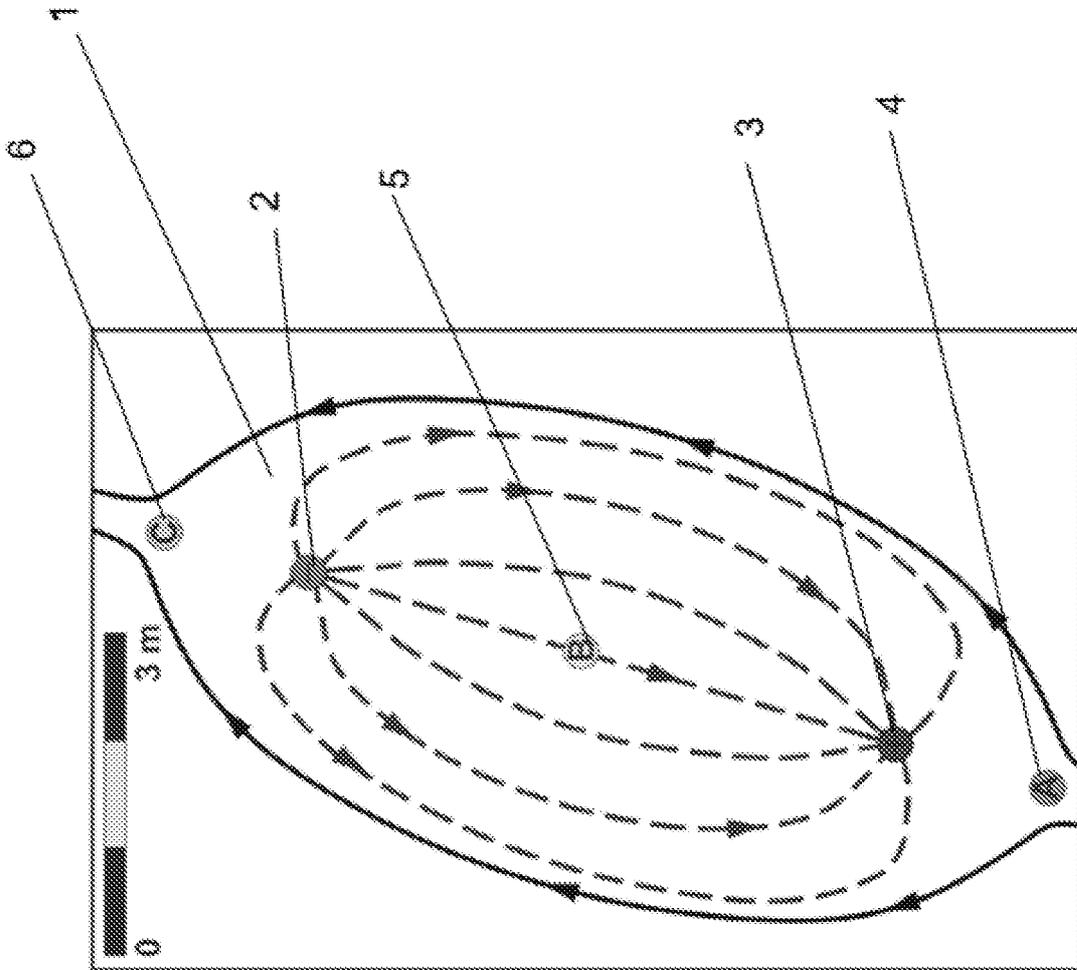


FIG. 1

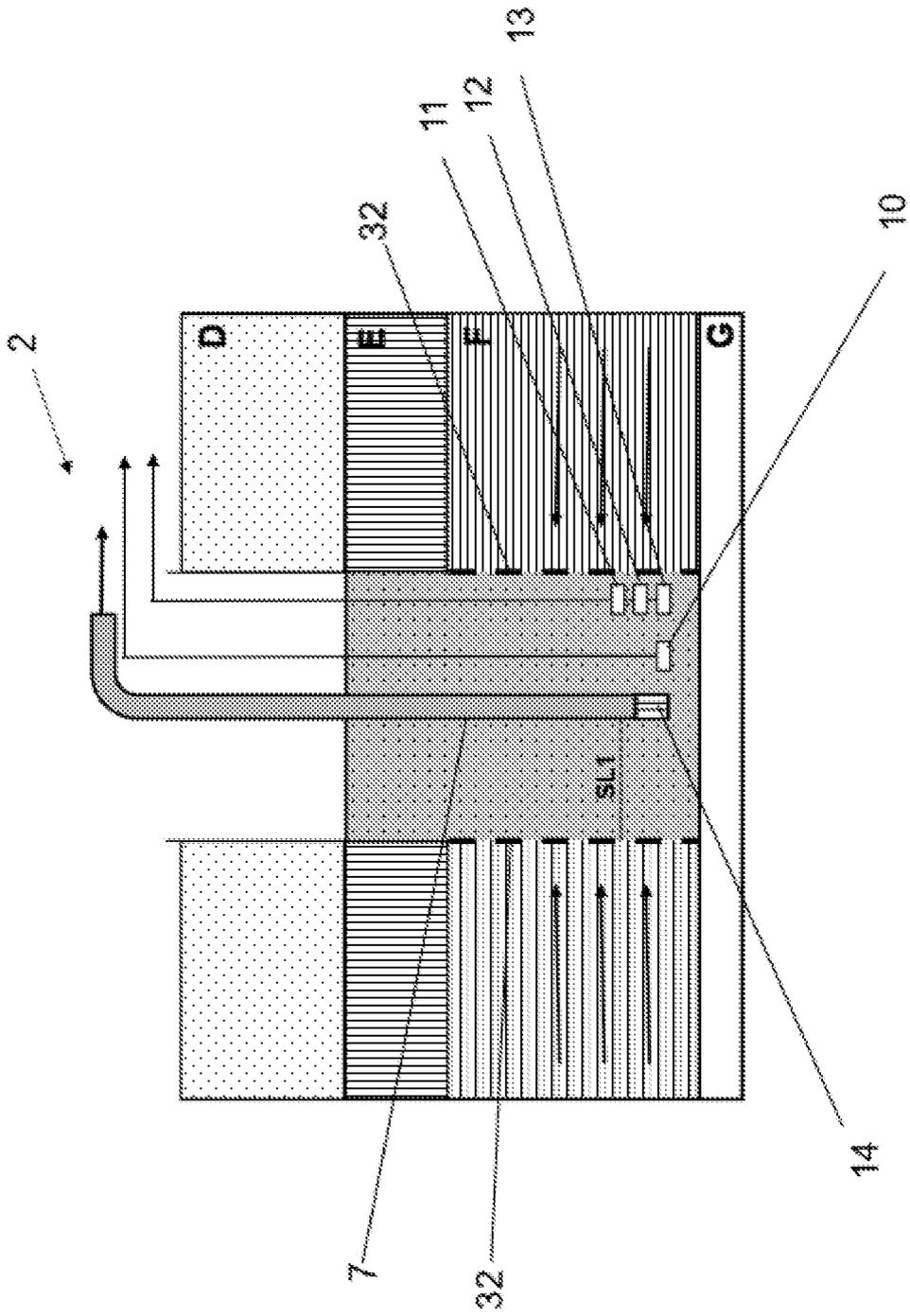


FIG. 2

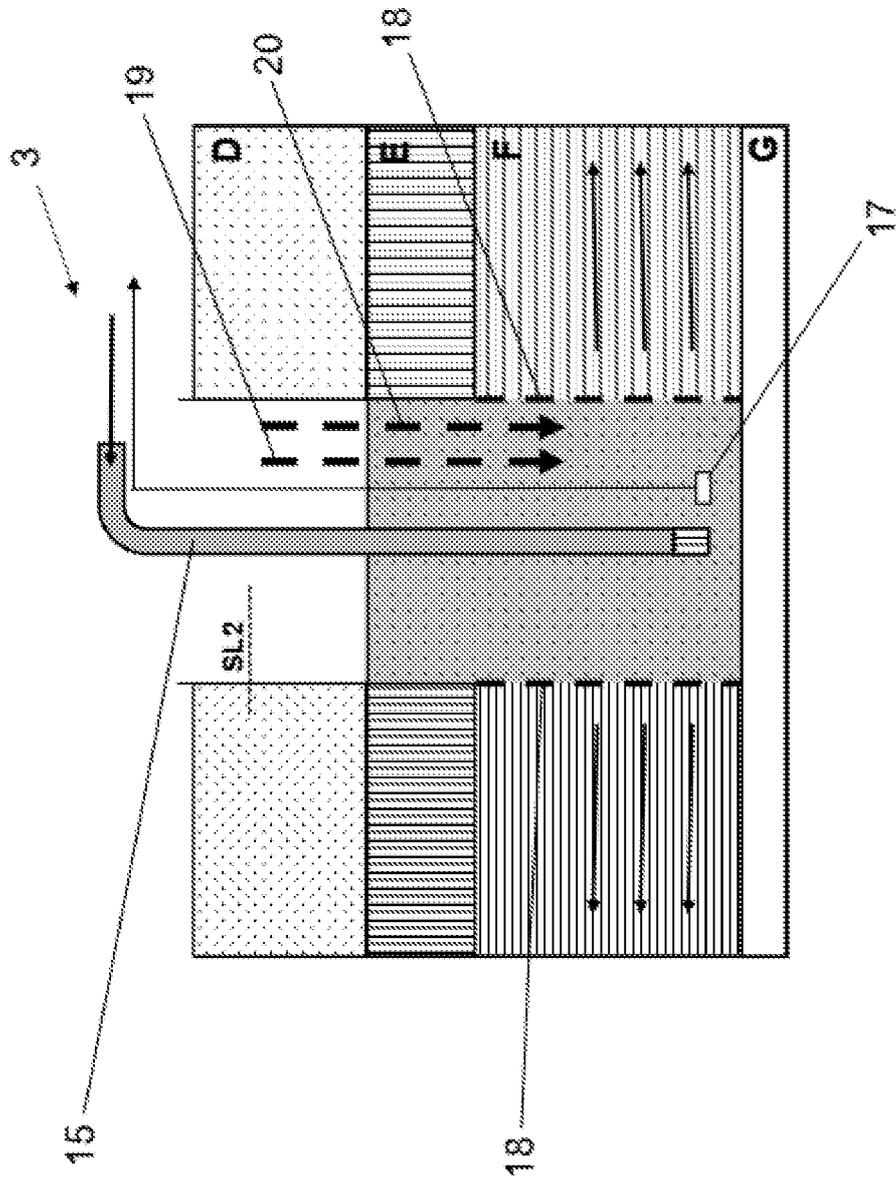


FIG. 3

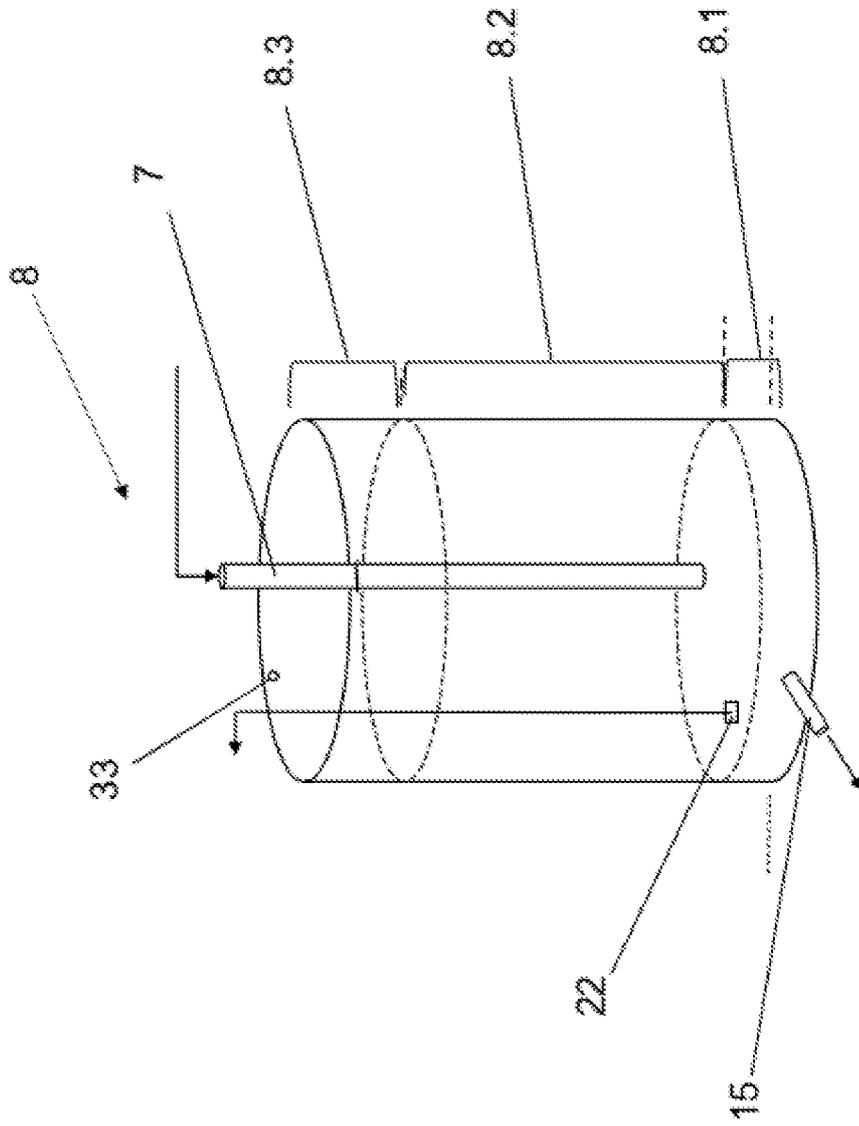


FIG. 4

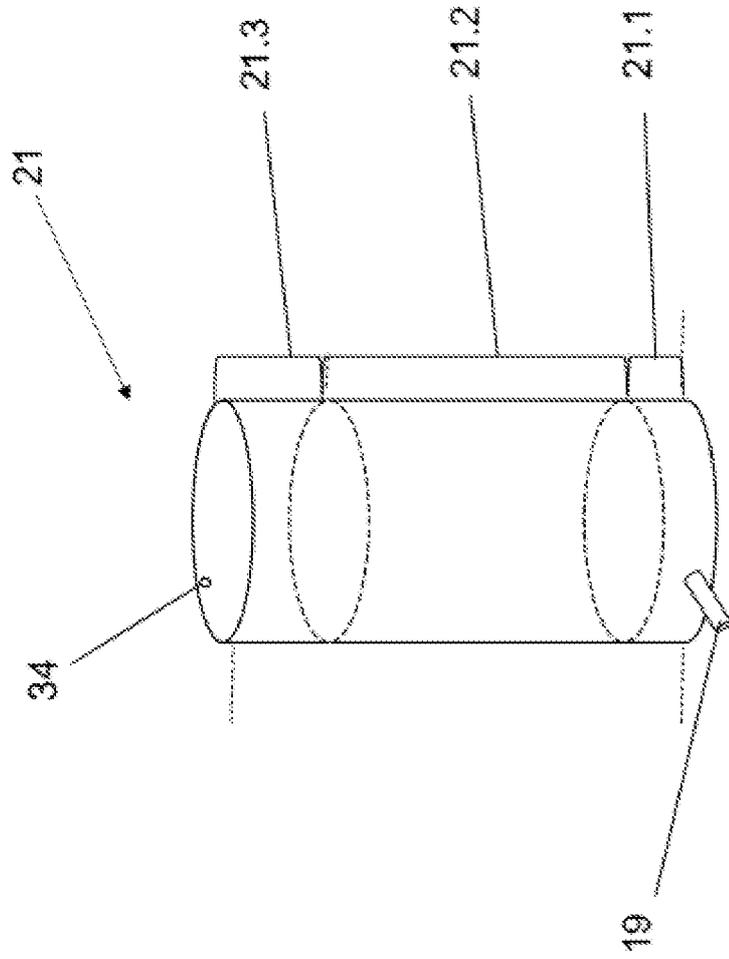


FIG. 5

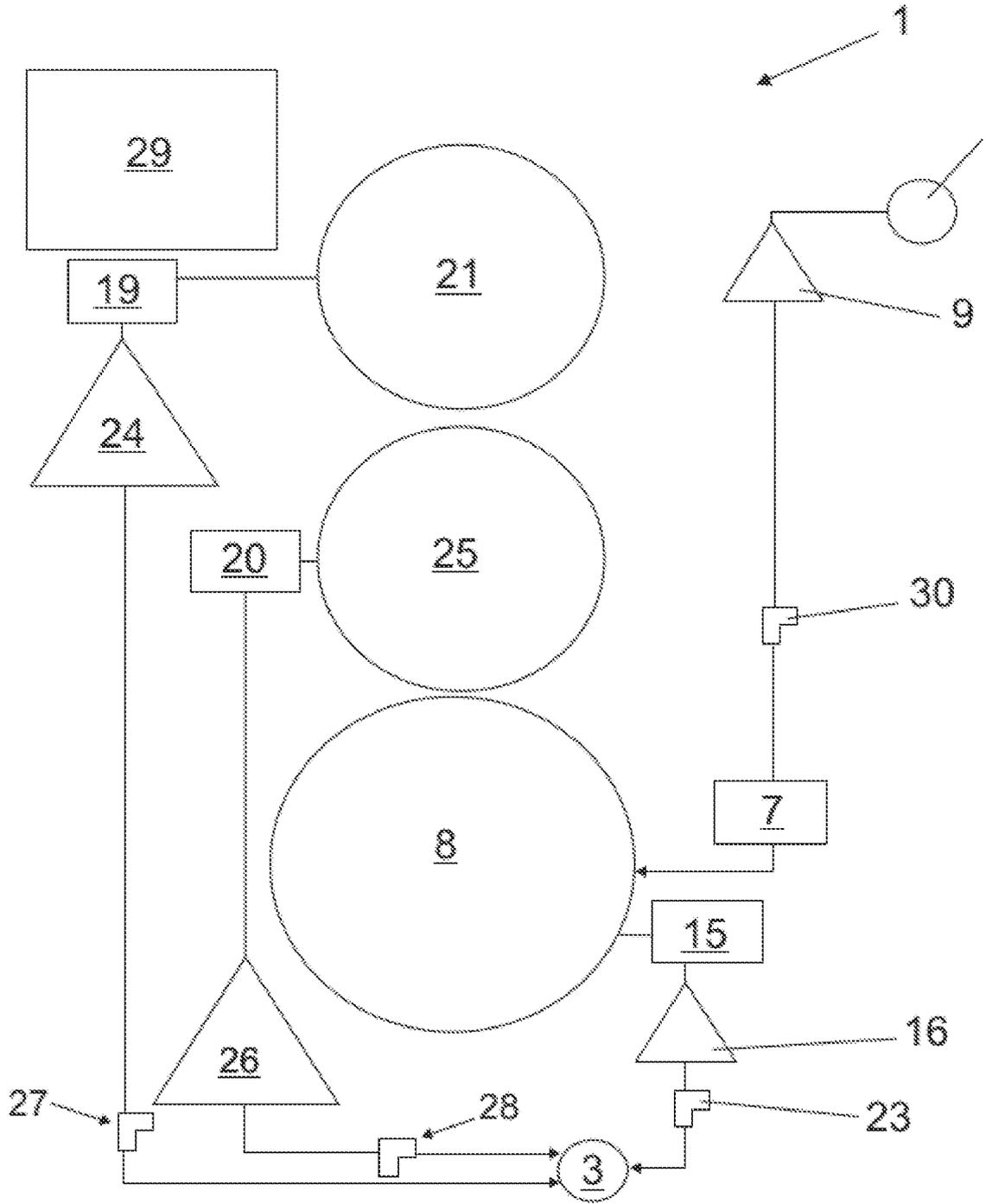


FIG. 6

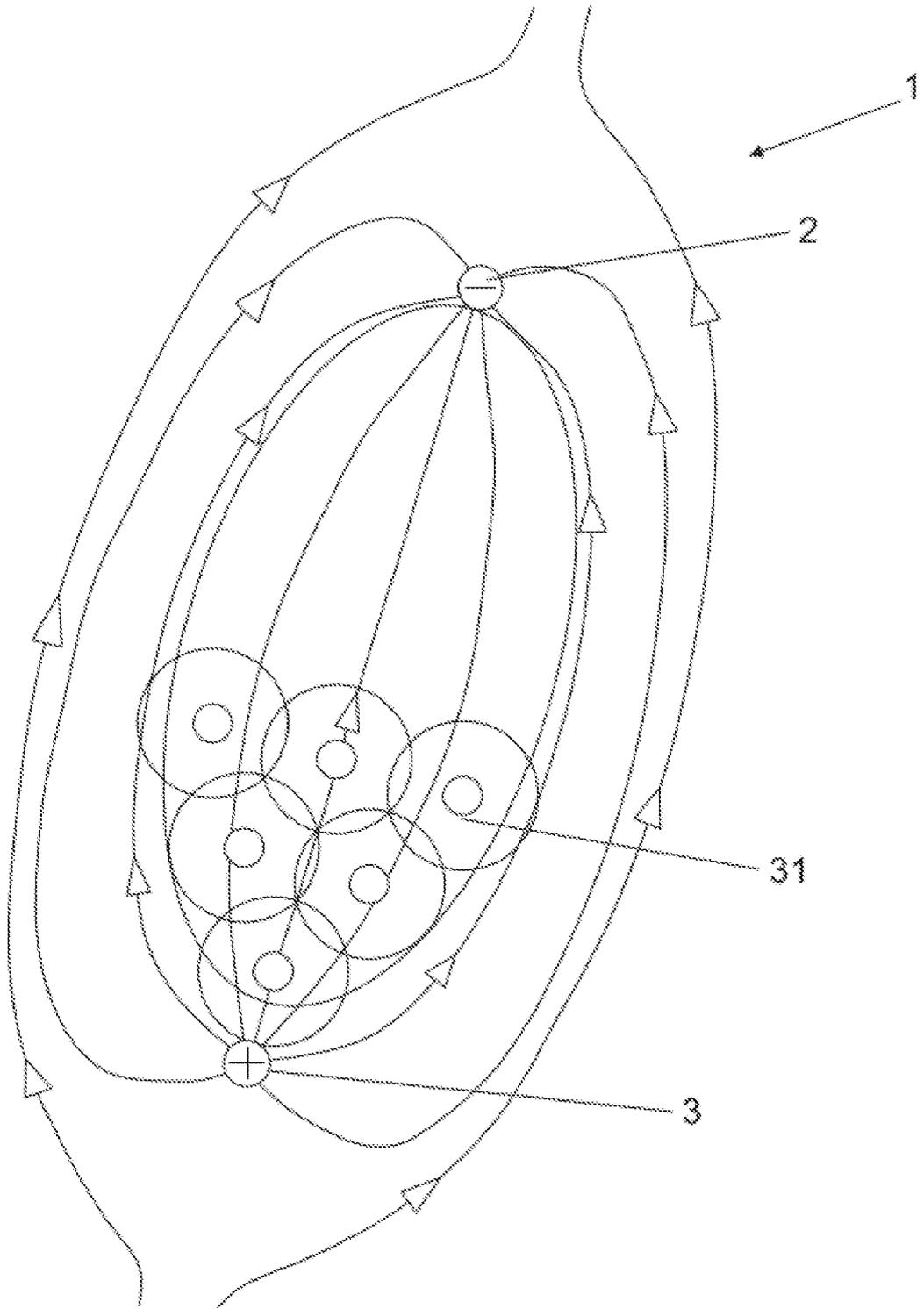


FIG. 7A

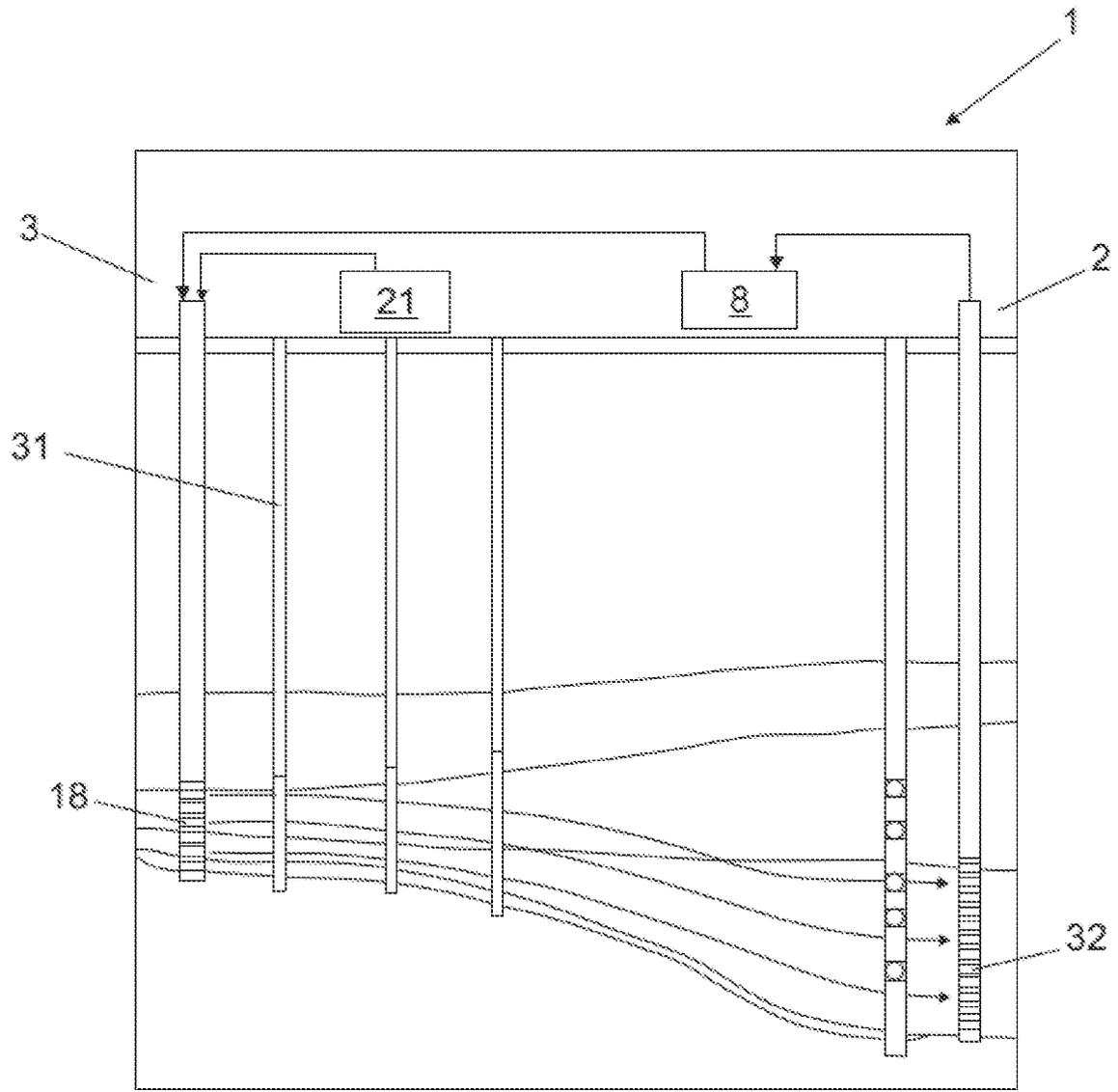


FIG. 7B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2023/070598

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C02F1/26 (2023.01)

B09C1/02 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C02F, B09C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, SEARCH TOOL (EPO), ESPACENET, INTERNET, NPL, WPIAP, WPI

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 0174723 A1 (BECHTEL BWXT IDAHO LLC) 11/10/2001, claims and figures	1-45
A	WO 2006014126 A1 (TYRESOE MILJOEKEMI ET AL.) 09/02/2006, Abstract and figures	1-45
A	YANG MINJUNE et al.. Field-scale forward and back diffusion through low-permeability zones. Abstract	1-45

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
--	--

Date of the actual completion of the international search
03/11/2023

Date of mailing of the international search report
(06/11/2023)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer
I. Abad Gurumeta

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 913495337

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

Information on patent family members

PCT/ES2023/070598

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO2006014126 A1	09.02.2006	PL1794093T T3	29.08.2014
		ES2473322T T3	04.07.2014
		DK1794093T T3	16.06.2014
		EA200700266 A1	31.08.2007
		EA009891 B1	28.04.2008
		MX2007001487 A	11.06.2007
		US2007235387 A1	11.10.2007
		US7438814 B2	21.10.2008
		NO20071157L L	01.03.2007
		CN1997601 A	11.07.2007
		CN100564277C C	02.12.2009
		CA2574120 A1	09.02.2006
		CA2574120 C	01.05.2012
		BRPI0418991 A	11.12.2007
		AU2004321974 A1	09.02.2006
		AU2004321974B B2	30.07.2009
		EP1794093 A1	13.06.2007
EP1794093 B1	23.04.2014		
WO0174723 A1	11.10.2001	US2002008070 A1	24.01.2002
		US6402952 B2	11.06.2002
		AU5301601 A	15.10.2001

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº
PCT/ES2023/070598

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

C02F1/26 (2023.01)

B09C1/02 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)
C02F, B09C

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES, SEARCH TOOL (EPO), ESPACENET, INTERNET, NPL, WPIAP, WPI

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	WO 0174723 A1 (BECHTEL BWXT IDAHO LLC) 11/10/2001, Reivindicaciones y figuras	1-45
A	WO 2006014126 A1 (TYRESOE MILJOEKEMI ET AL.) 09/02/2006, Resumen y figuras	1-45
A	YANG MINJUNE et al.. Field-scale forward and back diffusion through low-permeability zones. Resumen	1-45

En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

<p>* Categorías especiales de documentos citados:</p> <p>"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.</p> <p>"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.</p> <p>"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).</p> <p>"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.</p> <p>"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.</p>	<p>"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.</p> <p>"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.</p> <p>"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.</p> <p>"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.</p>
--	--

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
03/11/2023

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
6 de noviembre de 2023 (06/11/2023)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
I. Abad Gurumeta
Nº de teléfono 913495337

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2023/070598

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
WO2006014126 A1	09.02.2006	PL1794093T T3 ES2473322T T3 DK1794093T T3 EA200700266 A1 EA009891 B1 MX2007001487 A US2007235387 A1 US7438814 B2 NO20071157L L CN1997601 A CN100564277C C CA2574120 A1 CA2574120 C BRPI0418991 A AU2004321974 A1 AU2004321974B B2 EP1794093 A1 EP1794093 B1	29.08.2014 04.07.2014 16.06.2014 31.08.2007 28.04.2008 11.06.2007 11.10.2007 21.10.2008 01.03.2007 11.07.2007 02.12.2009 09.02.2006 01.05.2012 11.12.2007 09.02.2006 30.07.2009 13.06.2007 23.04.2014
----- WO0174723 A1 -----	----- 11.10.2001 -----	----- US2002008070 A1 US6402952 B2 AU5301601 A -----	----- 24.01.2002 11.06.2002 15.10.2001 -----